

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ostrava2014

Jakub Jankových

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

**Realizace optického vysílače pro vnitřní
bezvláknovou komunikaci**
Realization of Optical Transmitter for Indoor
Wireless Optical Communication

Ostrava 2014

Jakub Jankových

Zadání bakalářské práce

Student:

Jakub Jankových

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Realizace optického vysílače pro vnitřní bezvláknovou komunikaci

Realization of Optical Transmitter for Indoor Wireless Optical Communication

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor optických vysílačů pro vnitřní bezvláknovou komunikaci.
2. Praktická realizace optického vysílače pro vnitřní bezvláknovou komunikaci.
3. Ověření správnosti měření na realizovaném modelu.
4. Zpracování a vyhodnocení výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. RAMIREZ-INIGUEZ, Roberto, Sevia M IDRUS a Ziran SUN. Optical wireless communications: IR for wireless connectivity. Boca Raton: CRC Press, c2008, xxxi, 344 p. ISBN 08-493-7209-7.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Andrej Líner**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry

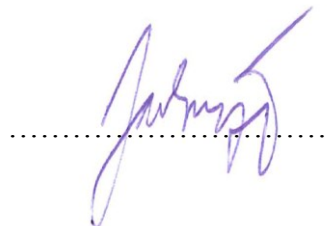


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 6. 5. 2014

A handwritten signature in purple ink is written over a horizontal dotted line. The signature is stylized and appears to be 'J. M. J.'.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu panu ing. Andreju Línerovi a jeho kolegovi panu ing. Petru Koudelkovi za odbornou pomoc a užitečné rady při zpracování bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá realizací optického bezvláknového vysílače určeného pro vnitřní prostory. V úvodních kapitolách práce rozebírá současné technologie optických bezvláknových sítí a zdrojů optického záření, které jsou vhodné pro osvětlení vnitřního prostoru. Další kapitola se zabývá analýzou, výběrem vhodných LED a jejich následném měření na experimentálním pracovišti v temné místnosti. V další části je rozebrána realizace optického bezvláknového vysílače. Konstrukce modulátoru a panel zdroje optického záření. Závěrem této práce je sestrojený optický bezvláknový vysílač. Výsledky z měření jsou zpracovány a porovnány s hodnotami v katalogových listech.

Klíčová slova

LED; optická bezvláknová síť; optické vysílače; optický bezvláknový kanál; modulace; zdroj optického záření

Abstract

The bachelor thesis deals with the implementation of optical wireless transmitter designed for interior spaces. In the opening chapters of the thesis analyzes the current technology of optical wireless networks and optical radiation sources that are suitable for the interior light. The next chapter deals with the analysis, selection of suitable LED and subsequent measurement of the experimental work in a dark room. The next section discusses the implementation of optical wireless transmitter. The design of the modulator and panel sources of optical radiation. The conclusion of this work is to construct an optical wireless transmitter. The results of the measurements are processed and compared with the values in the datasheets.

Key Words

LED; optical wireless network; optical transmitter; optical wireless channel; modulation; source of optical radiation

Seznam použitých zkratek

ARP	(Automatic Power Reducion), automatické snížení výkonu vysílače
AV	(anti-reflective), antireflexní vrstva
BER	(Bit Error Rate), bitová chybovost
CRI	(Color rendering index), index podání barev
FCS	(Frame Check Sequence), posloupnost zabezpečení rámce, část protokolu pro vysokoúrovňové řízení datového spoje
FEC	(Forward Error Correction), metoda zjišťování a opravy chyb vzniklých při přenosu, která využívá vkládání doplňkových kontrolních bitů
FSO	(Free Space Optic), optická bezvláknová datová síť P2P
IEEE	(Institute of Electrical and Electronics Engineers), mezinárodní institut elektroniků
IrDA	(Infrared Data Association), společnost, která vytváří standard pro optickou bezvláknovou komunikaci v infračervené oblasti
IWOL	(Indoor Wireless Optical Links), vnitřní optické bezdrátové spoje
LD	(Laser Diode), laserová dioda
LED	(Light-Emitting Diode), luminiscenční dioda
LOS	(Line of Sight), přímá viditelnost
NBI	(Narrowband Interference), úzkopásmové rušení
NLOS	(Non Line of Sight), nepřímá viditelnost
OFDM	(Orthogonal Frequency Division Multiplexing), ortogonální frekvenčně dělený multiplex
OOK	(On-Off Keying), modulace, kde je amplituda signálu kvantovaná do dvou úrovní
P2P	(Point-to-Point), komunikace mezi dvěma koncovými zařízeními
PC	počítač
PLL	(Phase-Locked Loop), zhluk fázového závěsu
PPM	(Pulse Position Modulation), modulace polohou impulsů
PWM	(Pulse Width Modulation), pulzně šířková modulace
RGB	(Red, Green, Blue), červená, zelená, modrá
USB	(Universal Serial Bus), univerzální sériová sběrnice
VLC	(Visible Light Communications), komunikace ve viditelném spektru
VPAN	(Visible Light Communication Personal Area Network), komunikace osobní sítě ve viditelném spektru
VPPM	(Variable Pulse Position Modulation), modulace polohou generovaných impulsů
WBI	(Pulsed Wideband Interference), pulzní širokopásmové rušení
YAG	yttrito-hliníkový granát

Obsah

1	Úvod	1
2	Optické bezvláknové sítě.....	2
2.1	Bezpečnost při přenosu dat v bezvláknové optické síti	2
2.2	Vnitřní optické bezvláknové sítě	3
2.3	IrDA	4
3	Vnitřní optické bezvláknové datové sítě ve viditelném spektru	6
3.1	IEEE 802.15.7	7
4	Optický bezvláknový kanál	9
4.1	Obecný model optického bezvláknového kanálu	9
4.2	Optický bezvláknový kanál ve viditelném spektru	11
5	Optické vysílače pro vnitřní bezvláknovou komunikaci.....	13
5.1	Laserové vysílače.....	13
5.1.1	Laserová dioda.....	13
5.2	LED vysílače.....	14
5.3	Modulační techniky	15
6	Praktická realizace optického vysílače pro vnitřní bezvláknovou komunikaci.....	17
6.1	Výběr vhodných LED	17
6.1.1	Experimentální měření LED.....	19
6.1.2	Návrh experimentálního pracoviště.....	20
6.1.3	Experimentální pracoviště pro měření optického výkonu a spektra.....	21
6.1.4	Naměřené a dosažené výsledky	21
6.1.5	Převodová (PI) charakteristika	21
6.1.6	Spektrální charakteristika	24
6.2	Návrh vysílací matice 3x3 LED.....	28
6.3	Návrh modulátoru	30
7	Měření výkonu vysílače v určitých vzdálenostech.....	33
7.1	Naměřené hodnoty	33
8	Závěr	37

1 Úvod

Tématem této bakalářské práce je realizace optického vysílače pro vnitřní bezvláknovou komunikaci. Bezvláknové sítě umožňují lidem být více flexibilní, protože se nemusejí zdržovat v pevném bodě, ale mohou se volně pohybovat po místnosti a sdílet informace ze kteréhokoliv místa.

Tato práce se nejprve zabývá jednotlivými technologiemi optické bezvláknové komunikace. Dále jsou v práci shrnuty zdroje optického záření. Světelným zdrojem bývá laser nebo luminiscenční dioda. V praktické části se práce zabývá realizací optického vysílače pro vnitřní bezvláknovou komunikaci, kde je zapotřebí zvolit správné zdroje optického záření. Jednou z hlavních kapitol této práce, je analýza a následné měření zvolených zdrojů optického záření na experimentálním pracovišti v temné místnosti. Následující kapitola zahrnuje návrh a realizaci vysílací matice a modulátoru. Záření se moduluje v optickém modulátoru, nebo v případě polovodičového zdroje optického záření přímo změnou budícího proudu.

Výsledkem této práce je realizace optického vysílače pro vnitřní bezvláknovou komunikaci. Následně bylo provedeno měření výkonu tohoto vysílače v určitých vzdálenostech. Při měření byl použit filtr s dolní propustí 525nm za účelem zjištění změny výkonu jednotlivých zdrojů optického záření. V závěrečné kapitole je popsán způsob měření a jeho vyhodnocení.

2 Optické bezvláknové sítě

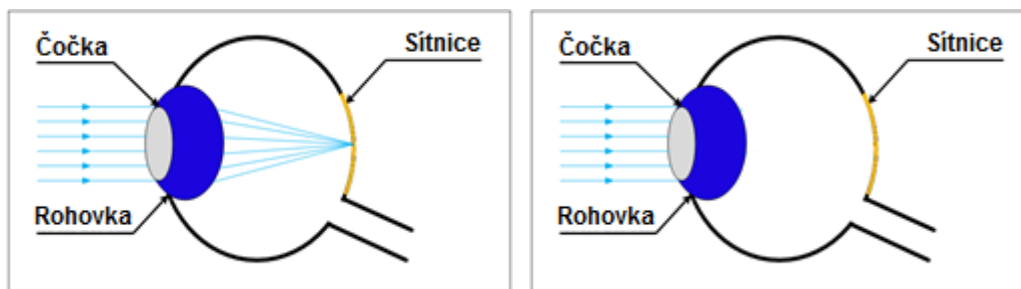
V roce 1960 byl zkonstruován první laser Theodorem H. Maimanem. Tehdejší lasery pracovaly pouze v pulsním režimu. Vznikla myšlenka, využít laser pro komunikaci frekvence z optického světla. Proběhlo několik testů využít laserové světlo jako nosič informace v atmosféře, ale bez úspěchu. V roce 1979 byl poprvé představen koncept optické bezvláknové sítě, a to F.R. Gfellerem a U. Bapstem [11]. Koncept, který představili, dosahoval přenosové rychlosti 1Mbps a využíval difúzní optické záření. V roce 1966 Charles K. Kao dokázal snížit ztráty na optickém vlákně a zároveň s vynálezem polovodičového laseru v roce 1970 (nezávisle Žores I. Alfjorov a Dimitrij Z. Garbuzov) se pozornost výzkumu přesunula k přenosu informací za použití optických vláken. V současnosti můžeme sledovat návrat k původní myšlence přenosu informací atmosférou i bezvláknovému přenosu informací uvnitř budov.

Optické sítě mohou dosahovat velmi vysokých přenosových rychlostí. Zároveň nabízejí bezpečný a širokopásmový symetrický přenos. Kdybychom porovnávali s ostatními sítěmi tak optická síť není závislá na omezeném regulovaném spektru a kmitočtové licenci jako síť radiové. Podmínkou je přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. Pro vysílání se používá laser nebo LED a pro přijímání optický detektor. Proto optické jednotky pracují v plném duplexním režimu. Nevýhodou přenosu optické bezvláknové datové sítě je závislost na vlivech atmosférického přenosového prostředí (mlha, sníh, smog, atd.) [10].

2.1 Bezpečnost při přenosu dat v bezvláknové optické síti

Jelikož se při přenosu dat v bezvláknové optické síti používají zdroje, které jsou nebezpečné pro člověka, je důležité dbát na dodržení bezpečnostních předpisů. Při přenosu pomocí laseru nám bezpečnost garantuje certifikát s normou IEC 60825-1 [12]. Některé výrobky dokáží snížit výkon laseru, pokud se někdo při přenosu dat nachází v dráze paprsku ARP (Automatic Power Reducion). Lasery s vlnovou délkou $\lambda = 1550$ nm můžou využívat větší výkon při stálém bezpečnostním provozu pro lidské oko a proto dosahují větší vzdálenosti. Lasery s vlnovou délkou $\lambda = 850$ nm byly z bezpečnostních důvodů lidského oka snižené výkonové podmínky [12].

Reakce lidského oka na různé vlnové délky jsou zobrazeny na obrázku (Obrázek 1). Laserové paprsky s vlnovou délkou $\lambda = 850$ nm jsou sice pro lidské oko neviditelné, nicméně proniknou až na sítnici. Laserové paprsky s vlnovou délkou $\lambda = 1550$ nm jsou absorbované čočkou.

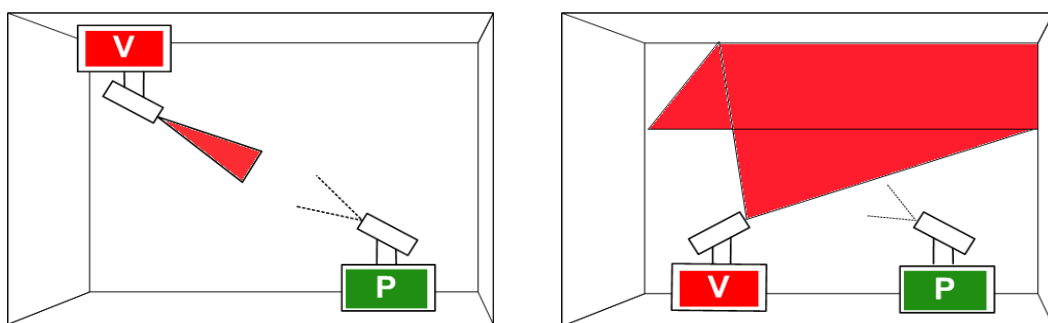


Obrázek 1: Reakce lidského oka na vlnové délky $\lambda < 1400 \text{ nm}$ a $\lambda > 1400 \text{ nm}$

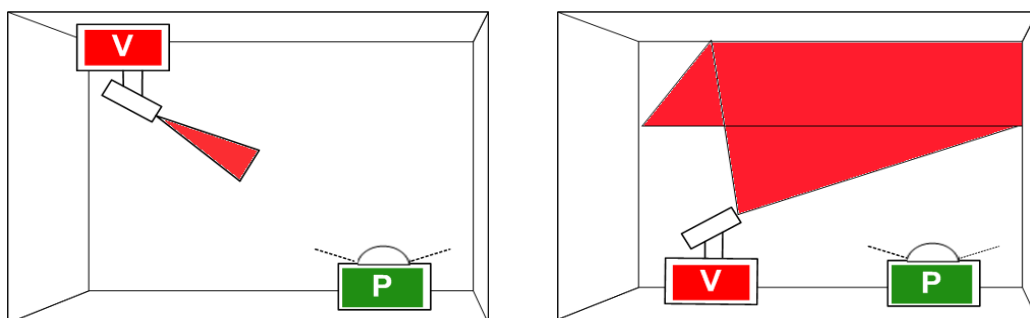
2.2 Vnitřní optické bezvláknové sítě

Vnitřní optické bezvláknové sítě můžeme rozdělit podle kritérií návrhu do několika variant. Prvním kritériem je viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. Tyto bezvláknové optické systémy mají přímou viditelnost a proto se nazývají LOS (Line of Sight). Systémy s nepřímou viditelností se nazývají NLOS (Non Line of Sight). Systém LOS přenáší signál v rámci přímé a volné trasy od vysílače k přijímači. Podmínkou přenosu je, aby zóna mezi vysílačem a přijímačem byla bez jakýchkoliv překážek, protože pokud, není tato podmínka splněná, nastává pokles signálu. Velikost zóny, která musí být bez překážek, vychází z pracovní frekvence a vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem. Systém NLOS na rozdíl od LOS nepřenáší signál v rámci přímé trasy, ale využívá odrazů od různých překážek v daném prostoru, proto se tento systém označuje jako difúzní. Difúzní systémy pracují bez ohledu na překážky nebo osoby v daném prostoru. Nevýhodou je snížená přenosová kapacita, kterou způsobuje poměrně složitá cesta, kterou musí signál projít [5].

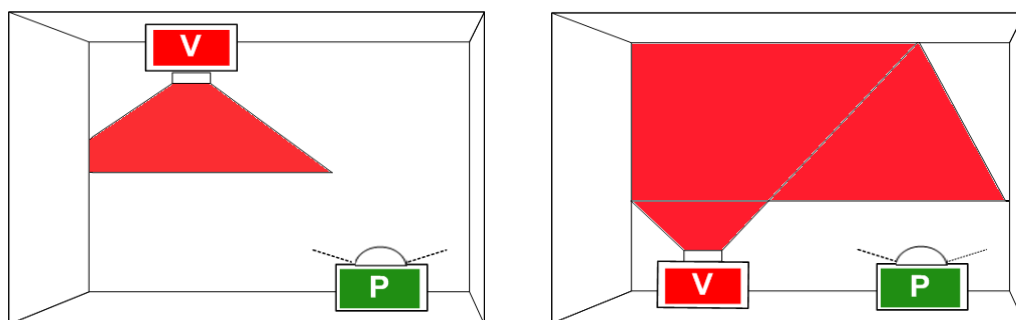
Druhým kritériem je směrovost mezi přijímačem a vysílačem. Pro vytvoření spojení u přímého systému je důležité zajistit směrovost mezi přijímačem a vysílačem. Na rozdíl od něho využívá nepřímé spojení širokoúhlé vysílače a přijímače, který částečně řeší problematiku jejich polohování. Pro zajištění mobility koncových uživatelů je vhodné využít nepřímé spojení. Jako náhradní řešení lze použít hybridní spojení, které ovlivňuje přijímače a vysílače s různým stupněm směrovosti. *Obrázek 2 - Obrázek 4* zobrazuje klasifikaci variant vnitřní bezvláknové optické sítě mezi přijímačem a vysílačem.



Obrázek 2: Přímá viditelnost LOS a nepřímá viditelnost NLOS v přímém spojení (Directed)



Obrázek 3: Přímá viditelnost LOS a nepřímá viditelnost NLOS v hybridním spojení (Hybrid)

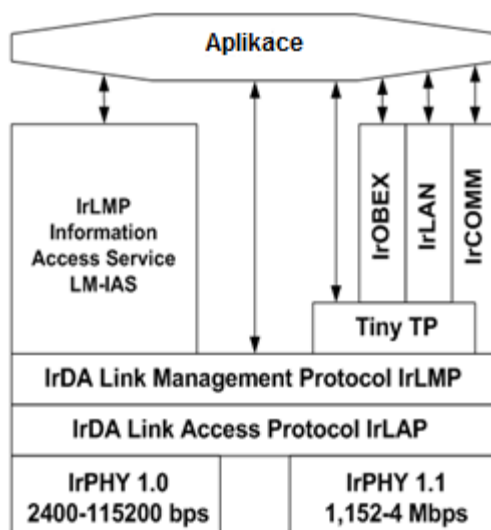


Obrázek 4: Přímá viditelnost LOS a nepřímá viditelnost NLOS v nepřímém spojení

2.3 IrDA

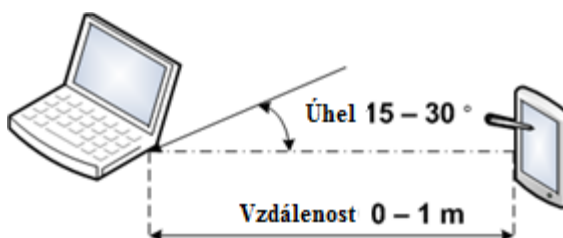
IrDA je infračervený komunikační port vytvořený v roce 1993 společností IrDa (Infrared Data Association), popisující bezdrátovou komunikaci pomocí infračerveného světla. IrDA přijímá a vysílá infračervené modulované záření o vlnové délce 875 nm, což nespadá do viditelného spektra lidského oka. Jako vysílač se používají infračervené LED (nebo infračervené LD). Naopak pro přijímač se používají fotodiody. Výrobci vyrábí sady obsahující, jak přijímač, tak i vysílač, aby byly rovnou použitelné v elektronických aplikacích. IrDA je součástí notebooků, mobilních telefonů, tabletů apod.

Momentálně je IrDA silně vytlačováno radiovým přenosem Bluetooth, který eliminuje základní nevýhodu infračerveného přenosu, kterou je potřeba přímé viditelnosti. Jednotlivé vrstvy IrDA protokolu jsou zobrazeny na obrázku (Obrázek 5).



Obrázek 5: Vrstvy IrDA protokolu pro komunikaci v infračervené oblasti [13]

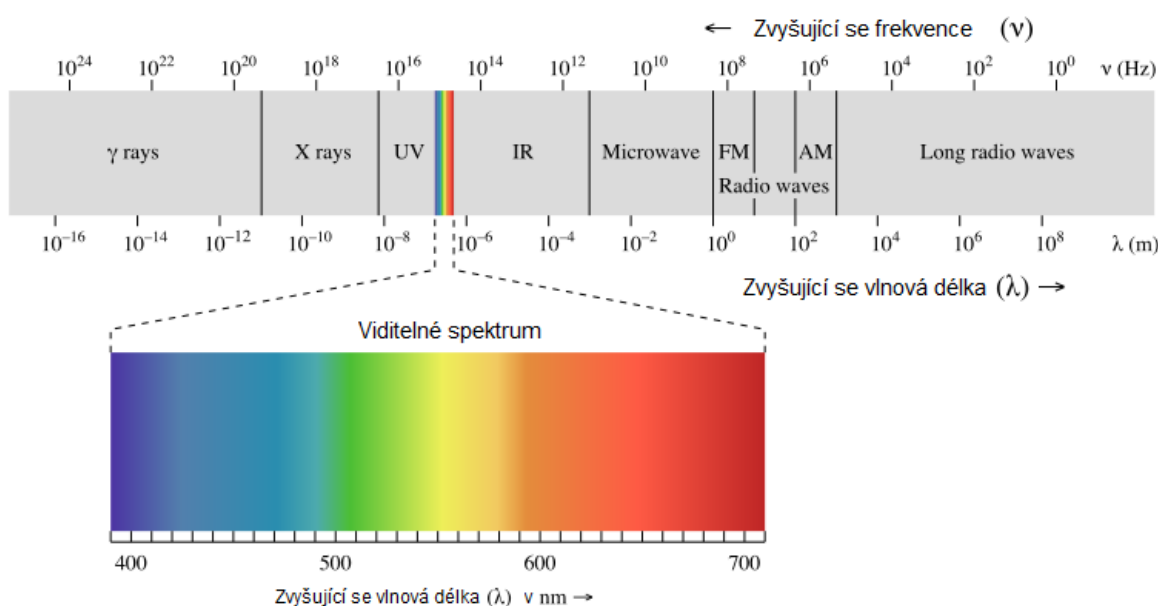
IrDA pracuje do vzdálenosti 1.0 m při bitové chybovosti BER je poměr chybně a správně přenesených bitů 10^{-9} při maximální úrovni okolního osvětlení 10 lux, které odpovídá dennímu světlu. Tyto hodnoty odpovídají pro nesouměrné přijímače a vysílače 15° a pro jednotlivé optické prvky se měří výkon do 30° . IrDA 1.0 má rychlost 2400-115200 b/s. Využívá pulzní modulaci 3/16 délky trvání bitu. Formát dat odpovídá sériovému přenosu, tzn. asynchronní přenos se start bitem. LED nemohou svítit stále maximálním výkonem, a proto se využívá pulzní modulace. IrDA definuje také low-power IrDA zařízení, které má dosah do 20 cm a maximální rychlost 115kb/s. Verze IrDA 1.1 využívá modulačního formátu RZ. Je-li přenosová rychlost 4Mbps, tak komunikační systém vyžaduje modulační formát 4-PPM (4-Pulse Position Modulation) a fázový závěs PLL (Phase-Locked Loop). FSO, a nebo verze 1.4 dosahuje přenosové rychlosti až 16Mbps v poloduplexní P2P komunikaci [6].



Obrázek 6: Optická geometrie IrDA komunikace

3 Vnitřní optické bezvláknové datové sítě ve viditelném spektru

V posledních letech se rozvíjí vnitřní optické bezvláknové sítě využívající optické světlo ve viditelném spektru VLC. Rozsah viditelné oblasti je zobrazen na obrázku (Obrázek 7). Hlavní příčinu zajistil pokrok v technologii polovodičového osvětlení pomocí bílých výkonových LED (Light Emitting Diode). Podle způsobu vyzařování světla dělíme bílé LED na dvě kategorie. Do první kategorie patří bílé diody, které ve skutečnosti generují modré světlo za pomoci modrého čipu o vlnové délce 450 nm. Na tento čip se nanáší tenká vrstva žlutého luminoforu označovaného jako YAG (Yttrium, Aluminium, Garnet). Druhá kategorie využívá technologie RGB LED, kde se nachází trojice čipů (červený, zelený, modrý) a za pomoci adaptivního míchání barev generují bílé světlo [10].



Obrázek 7: Rozsah viditelné oblasti lidským okem

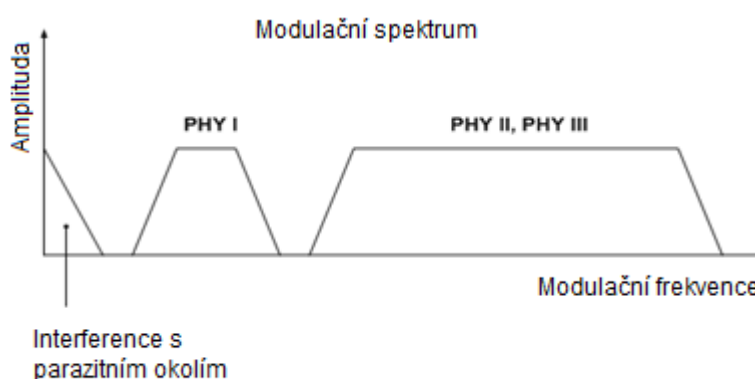
První využití bílé LED se objevilo v roce 2003, kdy Y. Tanaka prezentoval svoji práci s názvem využití bílé LED ve vnitřní optické bezvláknové komunikaci. Použil bílou výkonovou LED skládající se ze tří RGB čipů a dosáhl přenosové rychlosti o velikosti 400 Mbps. V roce 2010 bylo dosaženo rychlosti 513 Mbps za pomoci pouze modrého čipu a modulace OFDM. Autoři hovoří o tom, že v nejbližších letech překročí přenosovou rychlost o velikosti 1 Gbps [7].

3.1 IEEE 802.15.7

V prosinci roku 2011 byl zveřejněn standart IEEE 802.15.7 pro VLC (Visible Light Communication). Sít', založená na tomto standartě, se většinou označuje jako VPAN (Visible Light Communication Personal Area Network). Standart definuje fyzickou vrstvu a takzvanou „clean slate“ vrstvu založenou na přístupu (obnova konfigurace). Fyzická vrstva se dělí do tří typů. PHYI, PHYII, PHYIII, které využívají různé kombinace modulačních schémat [8].

Fyzické vrstvy architektury IEEE 802.15.7:

- **PHYI**: tento typ byl navrhnut pro venkovní použití s nízkou přenosovou rychlostí dat. Rychlost se pohybuje v rozmezí 12 až 267 kbit/s. Využívá dvou modulací VPPN a OOK.
- **PHYII**: tento typ byl navrhnut pro vnitřní použití s přenosovou rychlostí definovanou v rozmezí 1,25 až 96 Mbit/s. Stejně jako PHYI využívá dvou modulací VPPN a OOK.
- **PHYIII**: tento typ byl navrhnut pro vnitřní prostory, kde jsou k dispozici RGB zdroje a detektory. Přenosová rychlost se pohybuje mezi 12 až 96 Mbit/s.



Obrázek 8: Modulační spektrum standartu IEEE 802.15.7

Standart se taky zabývá největším problémem vnitřních optických bezvláknových datových sítí. Konkrétně se jedná o kolísání optického výkonu při absenci přenášených dat nebo při přenosu dlouhého řetězce log. 0. Jako rozumné řešení se nabídlo vložení velikostní variabilní klidné části do přenosového rámce (Idle Pattern), aby nedocházelo k velkým změnám optického výkonu. Klidnou část lze vyřešit dvěma způsoby In-Band nebo Out-Band. In-Band nevyžaduje změnu taktovací frekvence a je možné ho kontrolovat na přijímací části. Naopak Out-Band je v podobě více menších taktovacích frekvencí a variability výkonu zdroje optického zařízení. Kolísání optického výkonu je závislé na použité modulaci [14]:

- **VPPM** (Variable pulse position modulation): je to modulační formát, který je adaptován proti změně optického výkonu, protože amplituda daného pulzu je vždy konstantní a případná korekce je prováděna za pomoci změny šířky pulzu. VPPM se skládá z PPM modulace a PWM řešení optického výkonu.
- **OOK** (On-off keying): řeší se vložení datového rámce za účelem nastavení průměrného optického výkonu. Tímto proběhne rozdělení datového rámce na podrámce, které předchází resynchronizační pole. Rozdělení se provede, až když je vypočteno FCS (Frame Check Sequence) a použito FEC (Forward Error Correction).

4 Optický bezvláknový kanál

Při řešení distribuce optického záření nacházející se uvnitř místnosti se předpokládá, že elementy odrazu (například předměty, zdi) a zdroje optického záření (LED) mají Lambertovský charakter. Termín Lambertovský zdroj optického záření znamená, že svítivost optického záření má kosinovou závislost na úhlu \emptyset od normály vyzařovací plochy je dána jako:

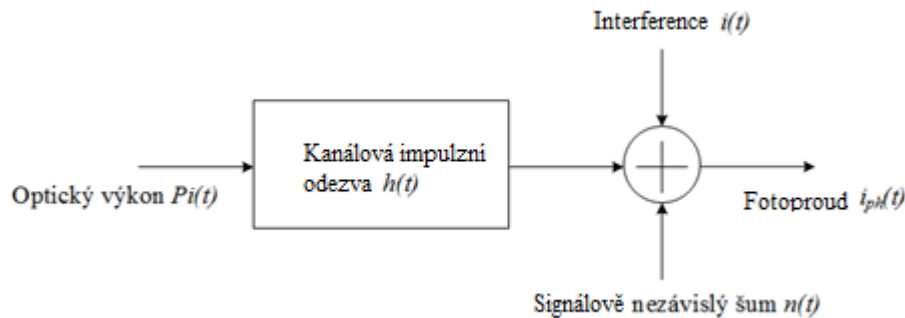
$$I(\emptyset) = I(0)\cos^m(\emptyset), \quad (4.1)$$

V tomto vztahu, kde $I(0)$ představuje svítivost zdroje optického záření v normále vyzařovací plochy, úhel od normály vyzařovací plochy se značí \emptyset a řád Lambertovských zdrojů optického záření se značí m . Pro polovinu vyzařovací charakteristiky vysílače můžeme řád Lambertovských zdrojů optického záření vyjádřit vztahem [9]:

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln \left(\cos \emptyset_{\frac{1}{2}} \right)}. \quad (4.2)$$

4.1 Obecný model optického bezvláknového kanálu

Obecný model optického bezvláknového kanálu s intenzitní modulací s přímou detekcí IM/DD (Intensity Modulation/DirectDetection) je zobrazen na obrázku (Obrázek 9). Přenášený signál má průběh v podobě okamžitého výkonu $P_i(t)$ zdroje optického záření ve vysílači (LED). Takto výsledný přijatý signál $i_{ph}(t)$ odpovídá okamžitému fotoproudu fotodiody v přijímači. Bezvláknový optický kanál lze modelovat jako pásmový, lineární a časově invariantní systém s okamžitou hodnotou vstupního optického výkonu $P_i(t)$, výstupním fotoproudem $i_{ph}(t)$ a impulzní odezvou systému $h(t)$.



Obrázek 9: Model optického bezvláknového kanálu [9]

Optické bezvláknové datové sítě se v reálné situaci provozují za přítomnosti okolního parazitního optického záření, jak v infračervené tak i ve viditelné spektrální oblasti. Pomocí optického filtru je možné toto parazitní záření minimalizovat, přidává se výstřelkový šum, který je většinou dominantním zdrojem šumu v dobře navrženém přijímači. Na obecném modelu bezvláknového optického kanálu je tento šum označený jako $n(t)$ [7].

Mimo výstřelového šumu v bezvláknovém optickém kanále se také vyskytuje takzvaná ne-Gaussová a nestacionární interference. Hlavním předpokladem je, že se interference skládá z úzkopásmového rušení NBI (Narrowband Interference) a pulzního širokopásmového rušení WBI (Pulsed Wideband Interference). Tento jev můžeme vyjádřit vztahem.

$$i(t) = i_{nb}(t) + i_{wb}(t). \quad (4.3)$$

Jestliže komunikační optický kanál v místnosti tvoří pouze optické záření šířící se přímou cestou od vysílače k přijímači (LOS), tak je možné průměrný přijatý optický výkon fotodiody vyjádřit vztahem.

$$P_d = \sum^{LED} P_t \cdot H_d(0), \quad (4.4)$$

kde H_d je stejnosměrný zisk přímé optické trasy v podobě:

$$H_d(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{pd}}{2\pi D_d^2} \cos^m(\varnothing) T_s(\Psi) g(\Psi) \cos(\Psi) & 0, \Psi < \Psi_c \\ 0 & \Psi > \Psi_c \end{cases} \quad (4.5)$$

Ve vzorci Ψ značí úhel mezi normálou, která je kolmá k přijímací oblasti fotodiody a dopadajícím optickým zářením, Ψ_c je mezní úhel příjmu fotodiody, $T_s(\Psi)$ je zisk optického spektra, A_{pd} je oblast příjmu fotodiody a $g(\Psi)$ je zisk optického koncentrátoru.

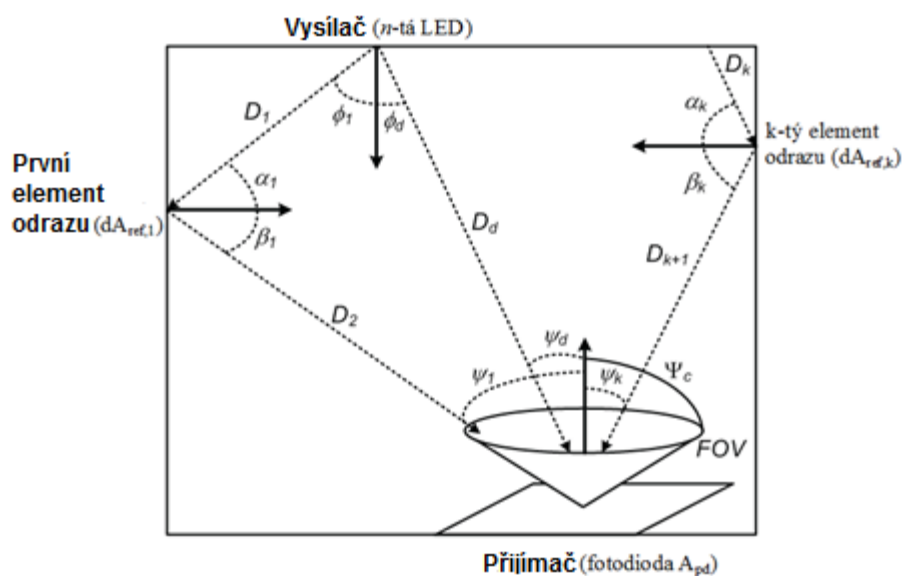
Pokud počítáme u šíření optického komunikačního kanálu uvnitř místnosti i s účastí optického záření, které se šíří pomocí odrazů od překážek (zdi, vybavení místnosti), je potřeba změnit předešlý vzorec na vztah.

$$P_r = \sum^{LED} \left\{ P_t \cdot H_d(0) + \sum^{ref} P_t dH_{ref}(0) \right\}, \quad (4.6)$$

kde dH_{ref} je zisk optické trasy pomocí odrazů od překážek v následující podobě:

$$dH_{ref}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{pd}}{2\pi D_1^2 D_2^2} p dA_{ref} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cos(\beta) T_s(\Psi) g(\Psi) \cos(\Psi) & 0, \Psi > \Psi_c \end{cases} \quad (4.7)$$

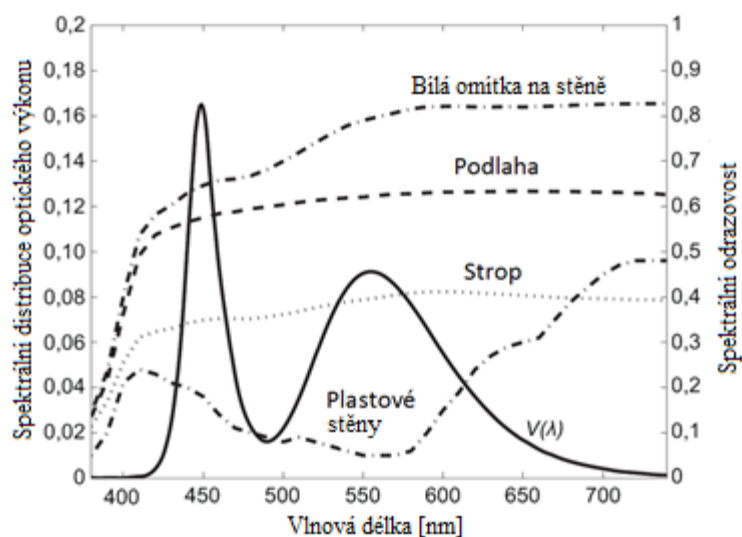
Ve vzorci (4.7) je D_1 vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem, ve vzorci (4.7) je D_2 vzdálenost mezi přijímačem a překážkou, α je úhel mezi normálou, která je kolmá na element odrazu a dopadajícím optickým zářením, β značí úhel mezi normálou, která je taky kolmá na element odrazu a odrazeným optickým zářením, ρ označuje faktor odrazu, viz *Obrázek 10*.



Obrázek 10: Konfigurace bezvláknového optického kanálu tvořeného vysílačem (skupina několika LED), přijímačem (fotodioda) a elementů odrazu v místnosti [7]

4.2 Optický bezvláknový kanál ve viditelném spektru

Pro vnitřní optickou bezvláknovou síť pracující ve viditelném spektru optického záření se používají bílé výkonové LED. Tyto LED vyzařují optické světlo v oblasti dvou vlnových délek. Čip, který obsahuje LED, vyzařuje při vlnové délce 450 nm a nanosený luminofor YAG vyzařuje optické záření v celém viditelném spektru 380 – 780 nm. Spektrální distribuce optického výkonu se značí jako $V(\lambda)$ a popisuje vyzařený výkon za jednotku vlnové délky.



Obrázek 11: Spektrální distribuce optického výkonu bílé výkonové LED a spektrální odraz materiálů v místnosti [9]

Spektrální odraz, značený jako $\rho(\lambda)$, představuje vliv odrazu materiálu v závislosti na vlnové délce. Ztráty přenosové cesty a časového zpoždění ovlivňuje vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem.

5 Optické vysílače pro vnitřní bezvláknovou komunikaci

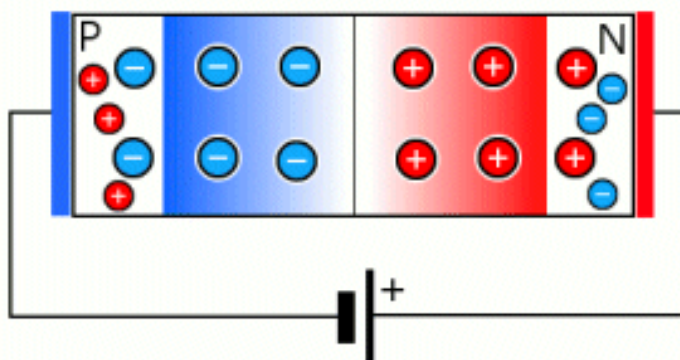
V této kapitole jsou představeny druhy vysílačů pro vnitřní bezvláknovou komunikaci (IWOL); (Indoor Wireless Optical Links).

5.1 Laserové vysílače

Laserové světlo vzniká, přechází-li atom z kvantového stavu s vyšší energií do kvantového stavu s nižší energií. Jedná se o koherentní, směrové světlo a dá se ostře fokusovat. Laserový vysílač je nutné provozovat za velmi přísných bezpečnostních podmínek.

5.1.1 Laserová dioda

V polovodičové struktuře ve vodivostním pásu materiálů typu n je velká koncentrace elektronů a ve valenčním pásu materiálu typu p velká koncentrace děr. Zde dochází k inverzi populace pro elektrony, kdy se větší počet elektronů nachází na hladinách s vyšší energií než na hladinách s nižší energií. Toto je důležitá podmínka, ale není jediná, kterou musíme dodržet pro funkčnost laseru.



Obrázek 12: Přechod p-n zapojený v propustném směru umožňuje přísun elektronů do materiálu typu n a děr do materiálu typu p [3]

Přeskočí-li elektron z pásu vodivostního do pásu valenčního, zapříčiní to, že elektron uvolní svoji energii ve formě fotonu. Právě tento foton stimuluje další přechod elektronu do pásu valenčního a tím vytvoří další foton tzv. stimulovanou emisi. Je-li v přechodu p-n dostatečně velký proud, tak může vzniknout ve stimulované emisi řetězová reakce a tím vzniká laserové světlo. Abychom tento děj udrželi, musíme dodržet, aby protilehlé roviny krystalu s přechodem p-n byly rovinné, rovnoběžné a opatřené zrcadly tak, aby došlo uvnitř krystalu k mnohonásobnému odrazu světla. Výstupní světlo je koherentní, takže pracuje jako laserová dioda. Oproti LED má laserová dioda vlnovou délku v užším intervalu. Proto se laserové diody často používají v optických sítích s optickými vlákny, ale i bez nich. Navrhují se tak, aby zářily v infračervené oblasti elektromagnetického spektra, protože v této oblasti mají optická vlákna minimální absorpci signálu. Optická vlákna využívají v této oblasti

tři okna (pro $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$, $\lambda = 1,31 \mu\text{m}$, $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$), kde vlákno má minimální absorpci signálu. Laserové diody se dělí do dvou základních skupin [1] [2]:

- Hranolové vyzařující lasery,
- plošné vyzařující lasery.

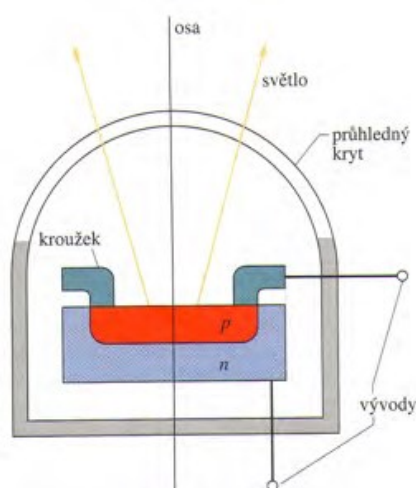
5.2 LD vysílače

LED je polovodičový světelný zdroj. Obsahuje přechod p-n. Prochází-li přechodem elektrický proud v propustném směru, přechod emituje nekoherentní světlo s širším spektrem než u laseru. Pásmo spektra záření diody je závislé na chemickém složení použitého polovodiče. Pásmo vyzařování LED sahají od ultrafialových, přes různé barvy viditelného spektra, až po infračervené pásmo. Pro světlo emitované p-n přechodem v LED, je důležitý polovodičový materiál s vysokou koncentrací elektronů ve vodivostním pásmu a zároveň s adekvátním množstvím děr ve valenčním pásmu. Tento jev proběhne, když na vysoce dotovaný přechod p-n je přiloženo velké napětí ve směru propustném (Obrázek 13). Proud I , který prochází součástkou, zabezpečí přísun elektronů do materiálu typu n a přísun děr do materiálu typu p. Pokud je vysoké dotování a zároveň dostatečně velký proud, tak je velmi úzká ochuzená zóna (několik mikrometrů). Materiál typu n odděluje velké množství elektronů od podobně velkého množství děr v materiálu typu p jenom úzkou zónou. Velká hustota děr a elektronů zaručí, že dojde k velkému počtu rekombinací a to způsobí emisi světla této zóny. Na obrázku (Obrázek 13) je zobrazena konstrukce reálné LED. Led se podle směru záření se dělí na [2]:

- SLED
- ELED

SLED se chovají jako Lambertovy světla. Jeho zářič se chová tak, že polovina výkonu se nachází v kuželu s vrcholovým úhlem 120° . SLED se používá k buzení MM vláken a má symetrickou stopu.

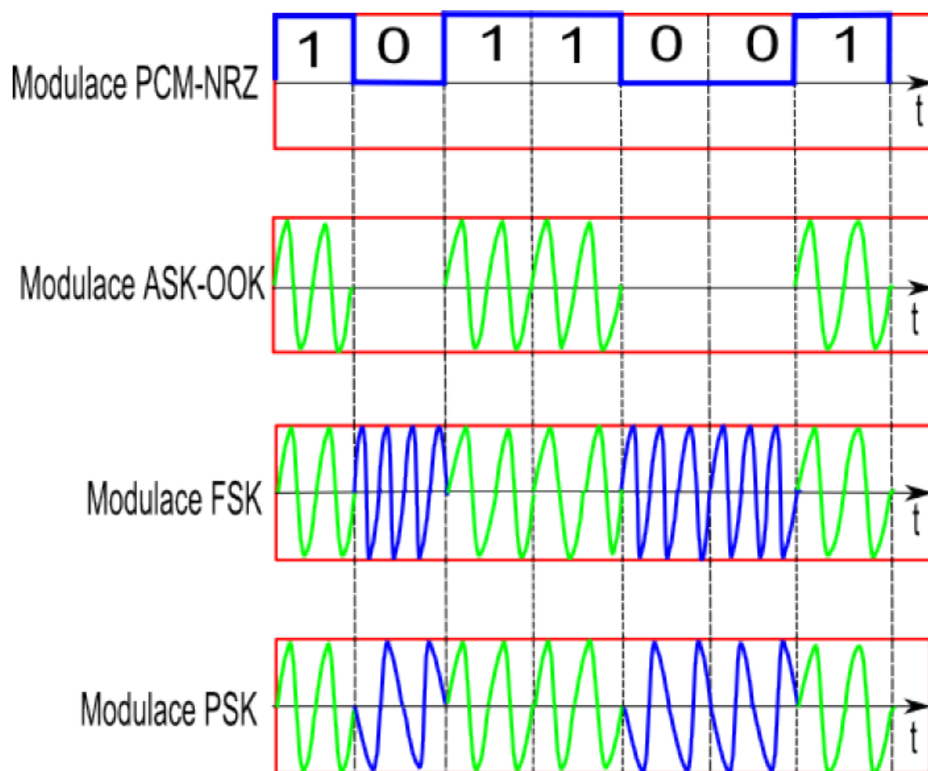
ELED se používají k buzení SM vláken. Oproti SLED mají naopak asymetrickou stopu. Takže pro optické vysílače se mohou použít jak LD, tak i LED.



Obrázek 13: Příčný řez diodou LED [2]

5.3 Modulační techniky

Nejpoužívanějším typem kódování v základním pásmu je impulzová kódová modulace PCM (Obrázek 14).



Obrázek 14: Základní tři možnosti dvoustavových modulací. A, binární modulační signál PCM, B, ASK signál s klíčováním amplitudy; C, FSK signál s klíčováním frekvence; D, PSK signál s klíčováním fáze [3]

Vytváří se tak, že modulační analogový signál se přemění na sekvenční signál v čase nespojitých impulzů PAM, jejichž amplitudy kopírují průběh analogového modulačního signálu. PAM signál vystavíme kvantizaci. Ten se dále kóduje. Kódování znamená, že se skutečná velikost, většinou vyjádřená v desítkové soustavě, převede do binární soustavy (nebo jiné). Vytvoří se signál s PCM modulací. Další modulace využívají jako modulační signál právě modulaci PCM (Obrázek 14).

Tato část se zabývá intenzivní modulací optického záření. Amplitudu, frekvenci i fázi nosné vlny lze modulovat binárním modulačním signálem. U dvoustavových modulací se modulovaná hodnota vlny mění jen mezi dvěma diskrétními stavy, z nichž jeden odpovídá modulačnímu bitu 0 a druhý modulačnímu bitu 1. Pro tyto diskrétní stavy nosné vlny se v digitálních modulacích používá termín symbol. Pro digitální modulace se používá termín klíčování, tudíž změny nosné vlny mezi několika diskrétními stavy. Jestliže se moduluje amplituda nosné vlny, vznikne dvoustavové klíčování amplitudovým zdvihem 2ASK. Obdobně je to i při klíčování frekvence, kde vzniká dvoustavové

klíčování frekvenčním zdvihem 2FSK. Zbývá klíčování fáze, při kterém vznikne dvoustavové klíčování fázovým zdvihem 2PSK, dnes označováno jako BPSK. Časové průběhy všech tří základních modulačních způsobů jsou zobrazeny na obrázku (Obrázek 14).

Všechny zobrazené průběhy mají zachovanou synchronizaci mezi bitovou frekvencí f_b modulačního signálu a frekvencí f_c nosné vlny, tzn. že změny modulačních signálů nastávají v dobu, kdy nosná vlna prochází nulou. ASK modulace má průběh OOK, při kterém se modulační bit 0 rovná nulové nosné vlně. Modulační spektrum OOK se skládá z funkce sync, jejíž spektrální čára první harmonické složky má větší velikost než základní nosná frekvence.

U dvoustavové modulace odpovídá každý modulační stav modulované nosné vlny jedinému bitu modulačního signálu PCM. Vícetavová diskrétní modulace se se začala rozvíjet skrze snahu po zvětšení přenosové kapacity digitální modulace. U vícetavových modulací každý stav modulované nosné vlny přenáší nejméně dva, nebo více bitů. Stav, při kterém se mění diskrétní stavy nosné vlny, nazýváme symbolová rychlost f_s . V přítomnosti jsou v rozvoji modulační formáty s více nosnými vlnami MCM, na které se přenáší pouze jeden modulační signál. Nejstarším systémem je MCM, který vychází z klasického frekvenčního multiplexování FDM. Velký pokrok přišel s použitím modulace OFDM. Využívá subnosné vlny, které vytvářejí ortogonální soustavu. Zde nedochází k vzájemným intervencím mezi nosnými vlnami ISI [3].

6 Praktická realizace optického vysílače pro vnitřní bezvláknovou komunikaci

V této kapitole budu popisovat, jak jsem postupoval při sestavení optického vysílače pro vnitřní bezvláknovou komunikaci. V posledních letech se uvažuje o šíření optického signálu ve viditelném spektru pomocí výkonových bílých LED. Tato technologie se nazývá VLC (Visible light communication). Zvolil jsem právě tuto technologii, protože viditelné světlo je méně nebezpečné pro vysoce výkonné aplikace, protože ho můžou lidé vnímat a chránit si tak oči před poškozením.

Technologie využívá zářivky, pro přenos signálů na 10 kbit/s, nebo LED až pro 500 Mbit/s. Speciálně konstruované elektronické zařízení obsahující fotodiodu může přijímat signály ze světelných zdrojů, i když v některých případech bude stačit mobilní telefon, fotoaparát nebo digitální fotoaparát. Obrazový snímač použitý v těchto zařízeních je ve skutečnosti pole fotodiód a v některých případech může pole sloužit jako jedna fotodioda. Toto čidlo může poskytovat vícekanálovou komunikaci (až na 1 pixel = 1 kanál) nebo prostorovou orientaci více světelných zdrojů

6.1 Výběr vhodných LED

V současnosti je na trhu opravdu hodně variant typů LED. Mezi přední výrobce těchto polovodičových světelných zdrojů patří Lumileds, Nichia, Cree a Osram Opto Semiconductors. Jelikož společnost Osram Opto Semiconductors se zabývá světlem a osvětlovacími systémy již od roku 1906, tak jsem zvolil LED právě od tohoto výrobce. Konkrétně jsem zvolil dvě kategorie Advanced Power TOPLED a Advanced Power TOPLED PLUS. Právě tyto kategorie poskytují vynikající výkon. Svého výstupního osvětlení, které je velmi vysoké, dosahují díky jeho nízkého tepelného odporu. Výhod mají hned několik:

- nabízí vysoký výkon,
- jdou k dispozici v široké škále barev,
- snadná montáž na DPS,
- vynikající životnost až 50 000 hodin díky silikonovému zapouzdření,
- nabízí kompaktní balíček s širokým rozsahem jasu a vysokou svítivostí.



Obrázek 15: Advanced Power TOPLED a Advanced Power TOPLED PLUS

Tyto LED se používají v automobilovém průmyslu jak v interiéru tak v i exteriéru. Dále se využívají pro vnitřní i venkovní nebo architektonické osvětlení a také pro světelné reklamy nebo různé dekorace. Slouží taky jako podsvícení displejů.

Z každé kategorie jsem vybral tři druhy diod. Modrou, teplou bílou a studenou bílou. Jelikož je v každé kategorii více LED se stejnou barvou, musel jsem pečlivě vybrat ty správné pro funkci vysílače. Po důkladném prostudování katalogových listů jsem dospěl k závěru tyto LED:

Kategorie Advanced Power TOPLED

- LB G6SP-V2BB-35-1
- LCW G6CP-DAFA-4V9X
- LW G6SP-EAFA-JKQL-1

Kategorie Advanced Power TOPLED PLUS

- LD G5AP-4M4N-35-1
- LCW G5GP-FYGY-5R8T
- LUW G5GP-GXHY-5C8E

Tabulka 1: Parametry zdrojů optického záření kategorie Advanced Power TOPLED

Advanced Power TOPLED						
Typ LED	Barva	Teplota Barvy / λ	I / Φ	I _F	U _F	Vyzařovací úhel
LB G6SP-V2BB-35-1	modrá	470 nm	10 lm/W	250 mA	4.1 V	120°
LCW G6CP-DAFA-4V9X	teplá bílá	2700 K	51 lm/W	250 mA	4.1 V	120°
LW G6SP-EAFA-JKQL-1	studená bílá	5600 K	46 lm/W	250 mA	4.1 V	120°

Tabulka 2: Parametry zdrojů optického záření Advanced Power TOPLED PLUS

Advanced Power TOPLED Plus						
Typ LED	Barva	Teplota Barvy / λ	I / Φ	I _F	U _F	Vyzařovací úhel
LD G5AP-4M4N-35-1	modrá	450 nm	36 %	200 mA	3.8 V	145°
LCW G5GP-FYGY-5R8T	teplá bílá	3000 K	58 lm/W	200 mA	3.8 V	135°
LUW G5GP-GXHY-5C8E	studená bílá	6500 K	81 lm/W	200 mA	3.8 V	135°

6.1.1 Experimentální měření LED

Cílem experimentálního měření bylo zjištění reálných parametrů zdrojů optického záření v bezvláknových sítích pro vnitřní prostory využívající viditelné spektrum. Jako zdroje optického záření jsem použil výkonové LED. Pro vzájemné porovnání bylo použito šest vybraných zdrojů optického záření, které jsou uvedeny v tabulkách (

Tabulka 1, 2).

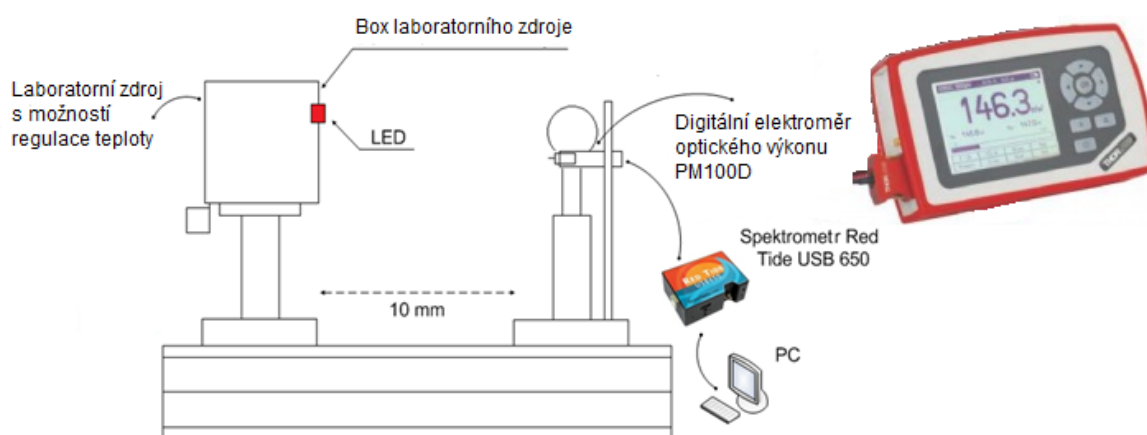
Ještě před začátkem měření, bylo potřeba navrhnout pracoviště. Pracoviště bylo navrženo tak, aby se v něm dalo měřit a zaznamenávat jednotlivé parametry vybraných LED. Všechna měření probíhala v temné místnosti.

6.1.2 Návrh experimentálního pracoviště

Před začátkem měření vybraných zdrojů optického záření bylo navrženo experimentální pracoviště, které bylo sestrojeno tak, aby bylo možné regulovat teplotu a proud podle potřeby měření. Pro zamezení účinku parazitního světla, bylo měření prováděno v temné místnosti.

6.1.3 Experimentální pracoviště pro měření optického výkonu a spektra

Při měření byly použity dva měřicí přístroje a jeden laboratorní zdroj. Dalším důležitým prvkem byly komponenty ze sady ThorLabs, díky kterým byly bez problémů uchyceny jednotlivé senzory a čidla použitých měřicích přístrojů. Laboratorní zdroj byl schopen nastavovat proud v rozmezí $I_F = 0 - 350$ mA se skokem 10 mA a teplotu okolí v rozmezí $T_a = 25 - 50$ °C. Ke změření optického výkonu byl použit digitální elektroměr ThorLabs PM100D. K tomuto měřicímu přístroji je potřeba zvolit fotodiodu se správným rozsahem vlnové délky. Pro nás byla ideální fotodioda s rozsahem 200 - 1100 nm. Vzdálenost senzoru a fotodiody od zdroje optického záření byla 10 mm. Takto sestavené experimentální pracoviště bylo schopné zaznamenat současné hodnoty optického výkonu a spektra LED. Model experimentálního pracoviště je zobrazen na obrázku (Obrázek 16).



Obrázek 16: Schéma experimentálního měřicího pracoviště parametrů LED

6.1.4 Naměřené a dosažené výsledky

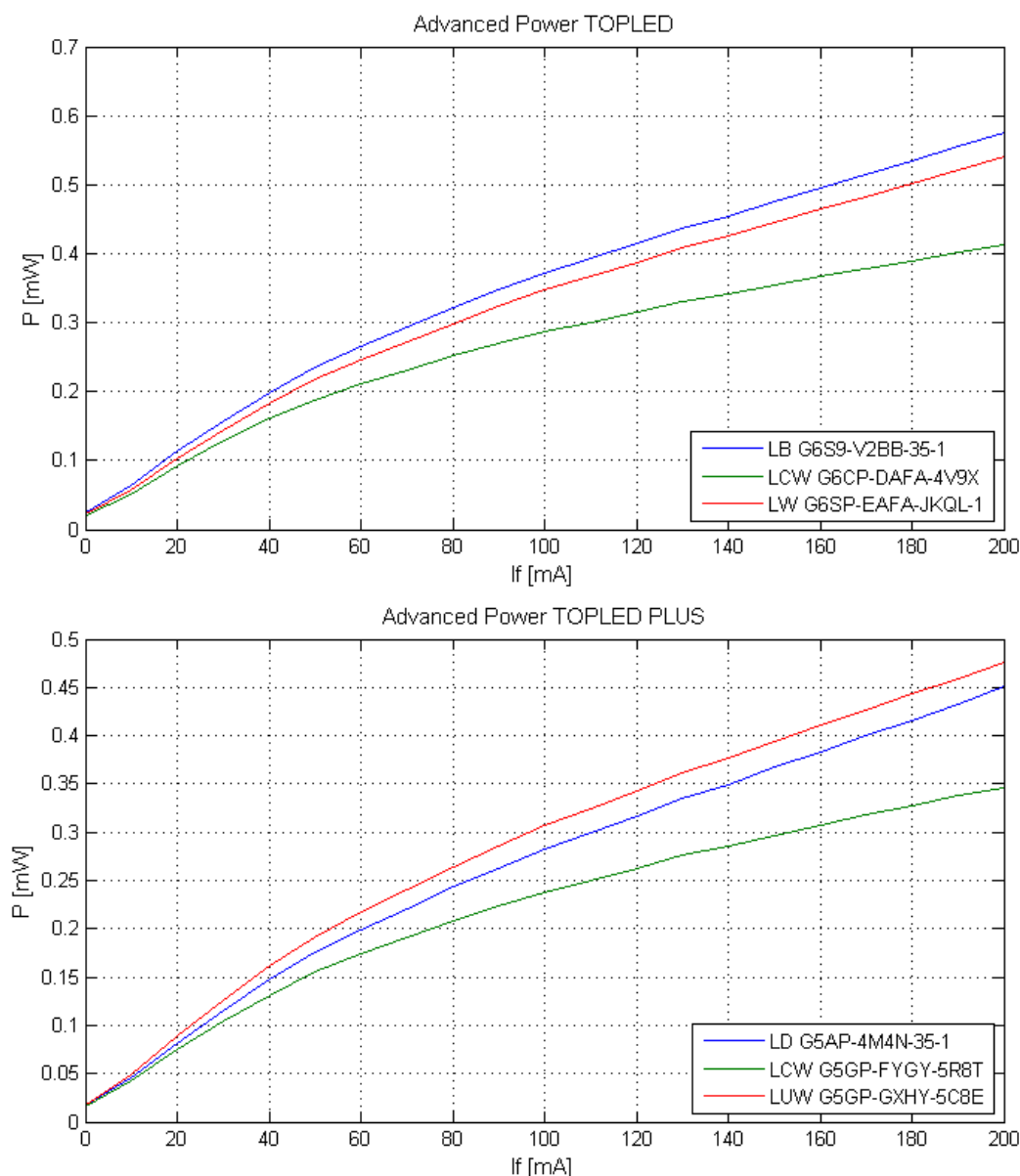
Při experimentálním měření byl změřen u vybraných zdrojů optického záření optický výkon a spektrum. Tyto parametry jsem měřil současně, aby výsledné hodnoty byly co nejpřesnější. Všechny typy LED jsem měřil pro teploty v rozmezí $T_a = 25 - 40$ °C. Zároveň probíhala regulace i protékajícího proud v rozmezí $I_F = 10 - 200$ mA. Při měření byl použit filtr s dolní propustí 525 nm od firmy Edmund Optics. Tento filtr má velmi ostrý přechod od vysílání k odrazu, což je velmi užitečné. Při průměrném přenosu 85 %, a blokování optické hustoty 2.0, zajišťuje vynikající kontrast. Jednovrstvá AR vrstva, na zadním povrchu, zvyšuje celkovou účinnost filtru. Propustnost filtru je 95 %.

6.1.5 Převodová (PI) charakteristika

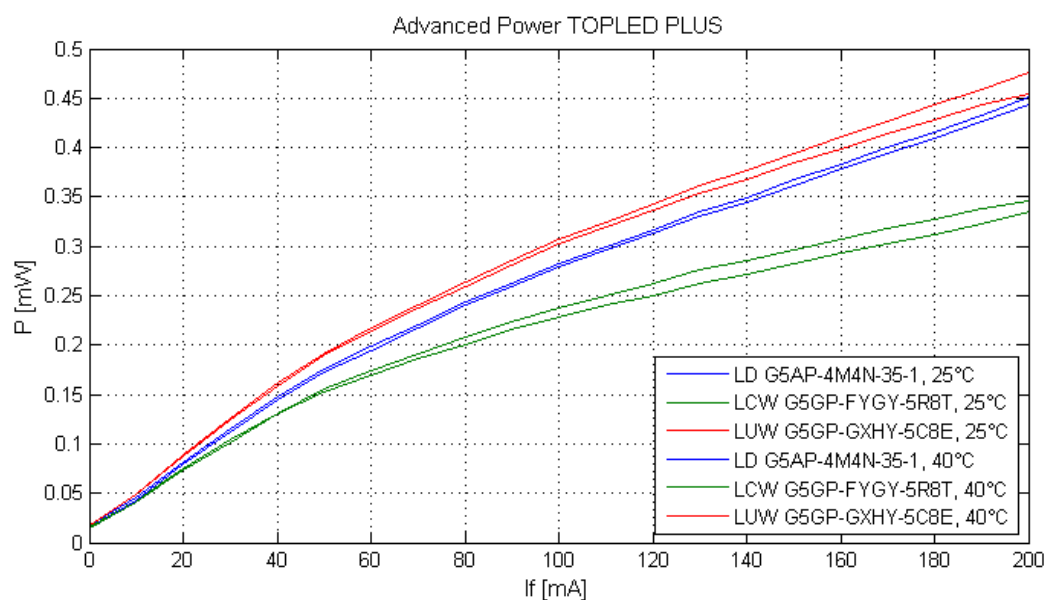
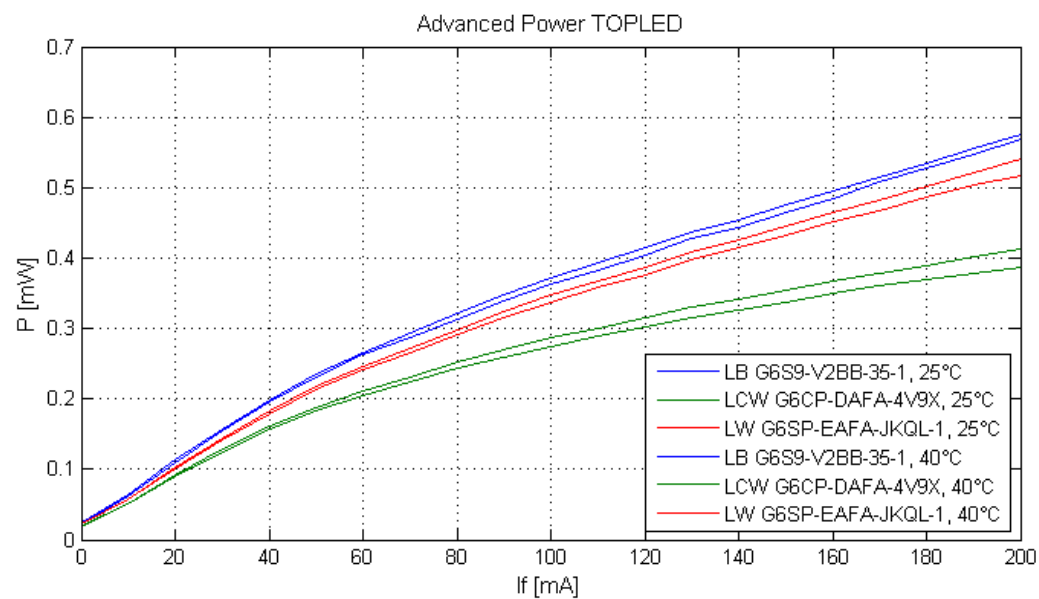
Převodová charakteristika, často označovaná jako PI charakteristika, popisuje závislost optického výkonu P na protékající proud I_F LED. Hodnoty optického výkonu byly odečítány z ThorLabs PM100D, kdežto jeho optický fotodetektor byl umístěn ve vzdálenosti 10 mm v přímém směru od zdroje optického záření (Obrázek 16). Zároveň byla měřena taky hodnota vyzařovacího spektra ovlivňující vlnovou délku a tím i hodnotu optického výkonu.

Na obrázku (Obrázek 17) je graf, který zobrazuje převodové charakteristiky výkonových LED kategorie Advanced Power TOPLED i kategorie Advanced Power TOPLED PLUS při konstantní teplotě $T_a = 25^\circ\text{C}$. Z grafu vyplývá, že nejvyšší hodnotu optického výkonu dosahuje modrá LED z kategorie Advanced Power TOPLED s protékajícím proudem 140 mA a při teplotě 25°C . Její optický výkon se přibližuje hodnotě 0,6 mW. Hodnoty, které udává výrobce, se jen nepatrně liší.

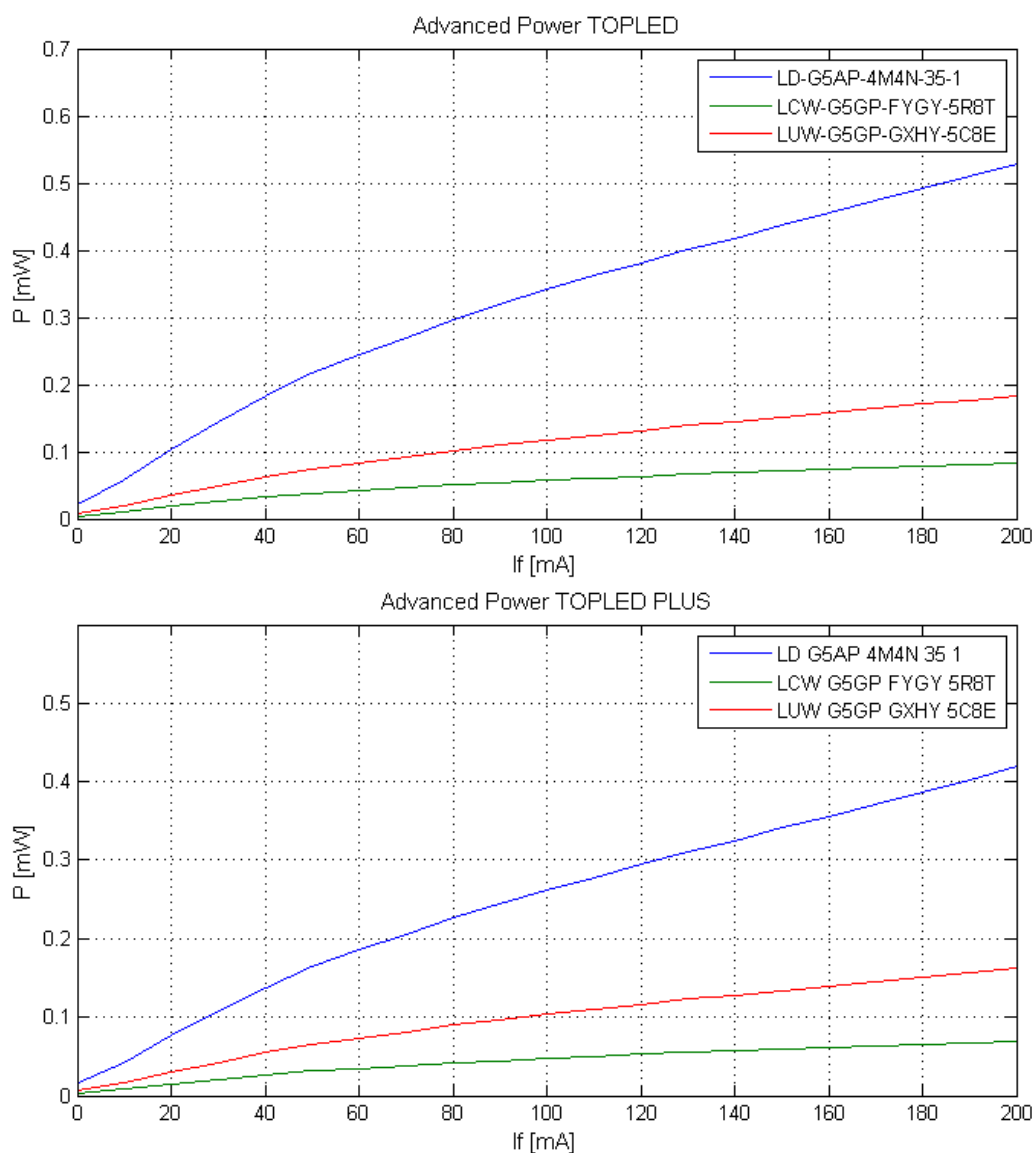
Na obrázku (Obrázek 18) je graf, který zobrazuje citlivost LED vůči teplotní změně okolí v rozmezí $T_a = 25$ a 40°C . Za výsledkem měření stojí zjištění, že optický výkon v závislosti na zvyšující se teplotě lineárně klesá. V grafu jsou vyznačeny vždy dvě spojnice naměřených hodnot pro každou LED zvlášť, s tím, že vždy spojnice dosahující větších hodnot je pro teplotu 25°C a spojnice dosahující hodnot nižších pro teplotu 40°C .



Obrázek 17: Přebodová charakteristika Advanced Power TOPLED a Advanced Power TOPLED PLUS při teplotě 25°C a protékajícím proudem 140 mA



Obrázek 18: Závislost PI charakteristiky Advanced Power TOPLED a Advanced Power TOPLED PLUS při teplotě 25 a 40 °C a protékajícím proudem 140 mA



Obrázek 19: Závislost PI charakteristiky Advanced Power TOPLED a Advanced Power TOPLED PLUS při teplotě 25 °C a protékajícím proudem 140 mA při použití filtru

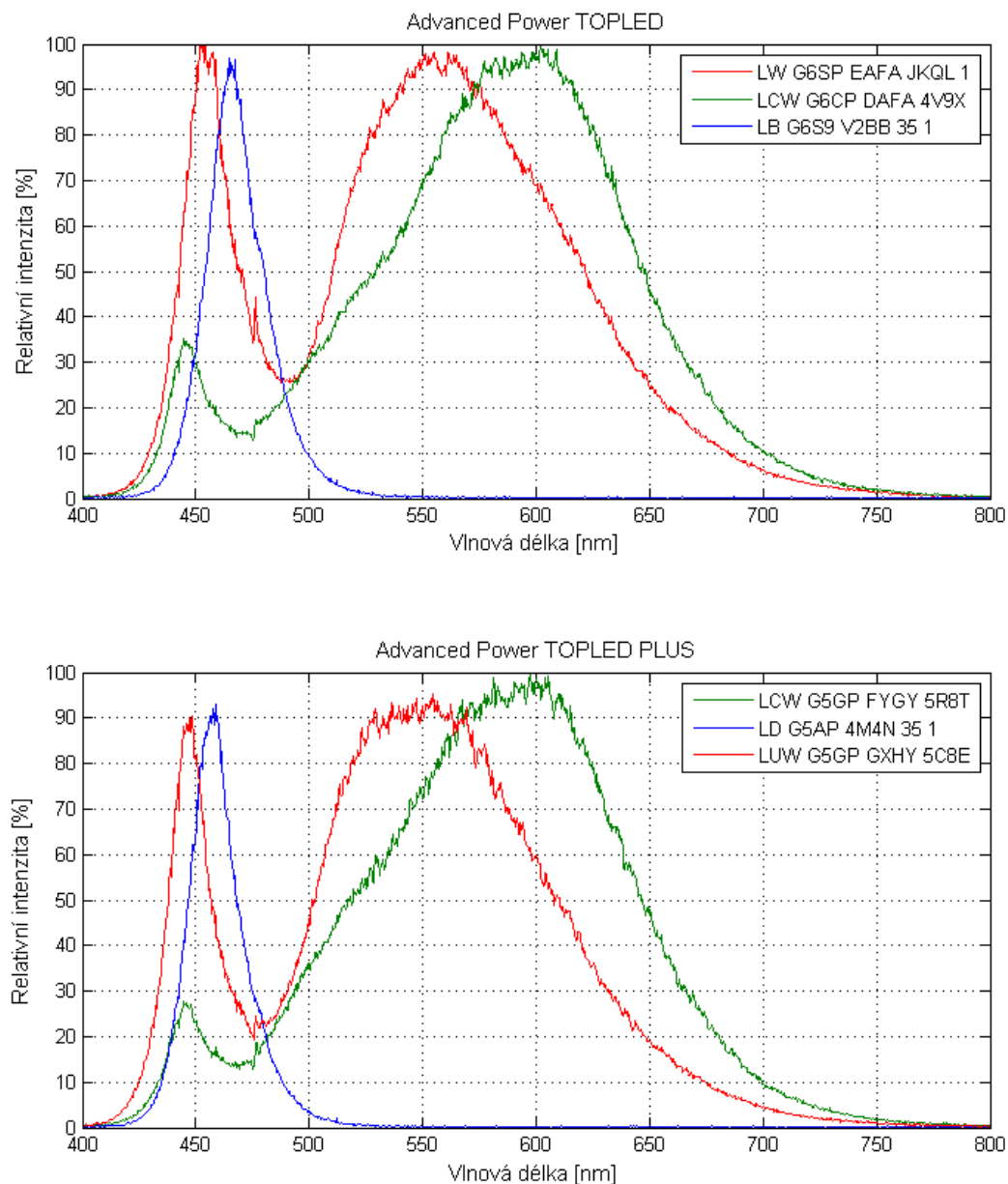
6.1.6 Spektrální charakteristika

Měření spektrální charakteristiky vybraných zdrojů optického záření LED (

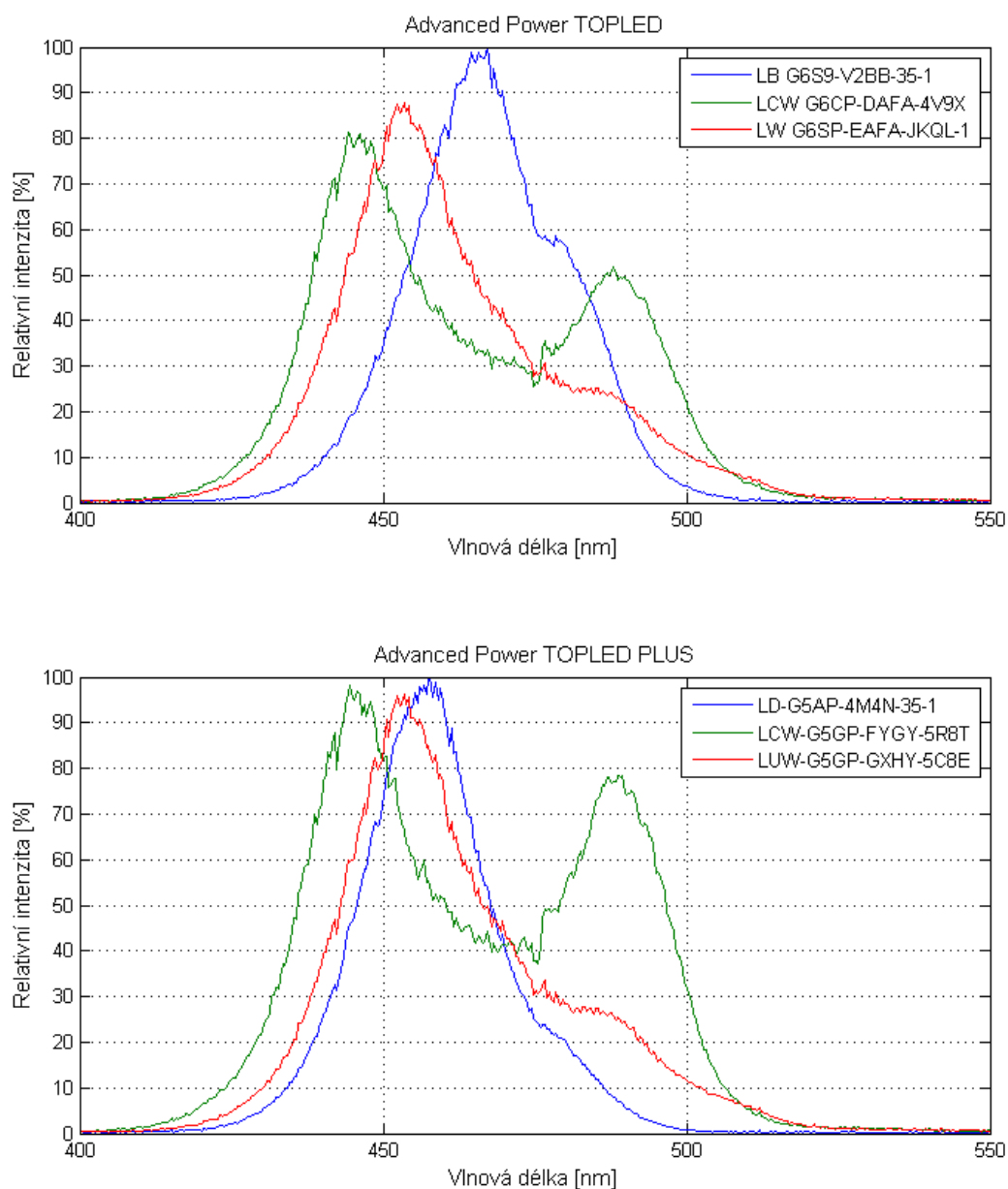
Tabulka 1) probíhalo za pomoci spektrometru Red Tide USB650 s přiloženým programem Safibra DAS 2.0 v temné místnosti. Čidlo spektrometru bylo umístěno v přímém směru od zdroje optického záření ve vzdálenosti 10 mm, viz (*Obrázek 16*).

Na obrázku (*Obrázek 20*) je graf, který zobrazuje spektrální charakteristiky vybraných LED (

Tabulka 1) při místní teplotě 25 °C. Ve výsledném grafu můžeme vidět vždy jednu modrou LED a dvě bílé, které mají odlišné vlnové délky pro oblast luminescence kterou vyzařuje čip, a fosforescence, kterou vyzařuje žlutý nanosený luminofor. Studené bílé LED mají potlačenou oblast fosforescence (kolem 550 nm) a dominantní oblast v rozmezí od 400 nm až 500nm. Teplejší bílé LED mají naopak potlačenou v oblasti spektra modrého čipu (kolem 450 nm) a dominantní oblast v rozmezí od 500 nm až 700 nm.

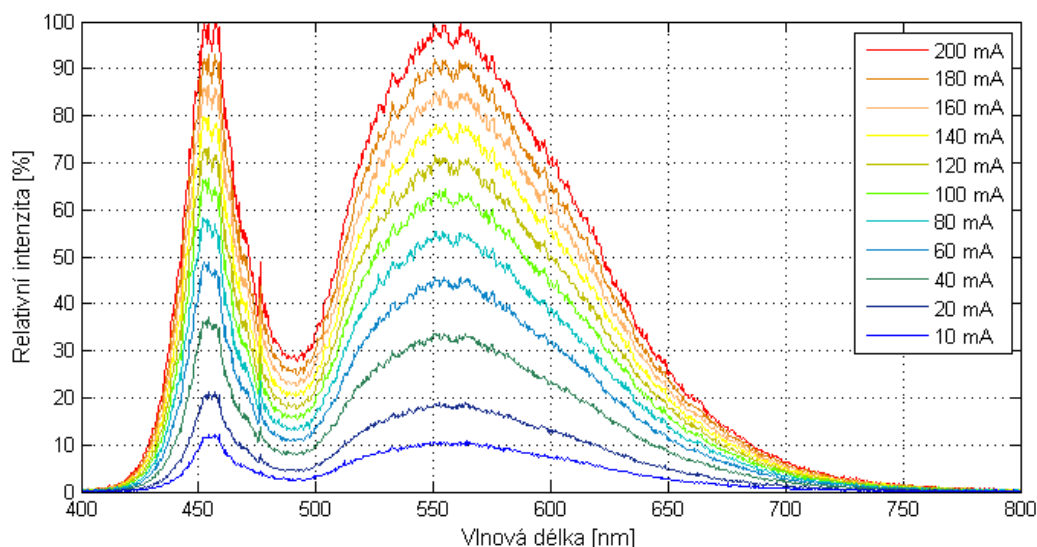


Obrázek 20: Spektrální charakteristika Advanced Power TOPLED a Advanced Power TOPLED PLUS při teplotě 25 °C a protékajícím proudem 140 mA



Obrázek 21: Spektrální charakteristika Advanced Power TOPLED a Advanced Power TOPLED PLUS při teplotě 25 °C a protékajícím proudem 140 mA s filtrem

Na obrázku (Obrázek 22) je zobrazená změna spektrální charakteristiky výkonové LED LW G6SP-EAFA-JKQL-1 v závislosti na změně proudu I_F při místní teplotě 25 °C.



Obrázek 22: Spektrální charakteristika typu LED LW G6SP-EAFA-JKQL-1 v závislosti na změně proudu I_F při místní teplotě 25 °C.

6.2 Návrh vysílací matice 3x3 LED

Návrh matice pro optickou bezvláknovou síť v rámci místnosti se realizoval na základě experimentálního měření zdrojů optického záření. Tato matice obsahuje 9 výkonových LED z kategorie Advanced Power TOPLED a Advanced Power TOPLED PLUS. Matice je tvaru čtverce. Mezery mezi jednotlivými zdroji optického záření jsou 15mm. Kdyby byly mezery menší, tak by se zdroje optického záření navzájem více zahřívaly. Matice má vyzařovací úhel 120 °. Těchto matic bylo celkem realizováno šest. Vždy jedna matice se zdroji optického záření stejného typu. Při tvorbě matic se počítalo s odděleným napájením LED a řídicího obvodu, proto je na plošném spoji matice umístěn i filtrační kondenzátor. Matice se k řídicímu obvodu připojuje pomocí konektoru (viz Obrázek 24).

Advanced Power TOPLED

- modrá: LB G6SP-V2BB-35-1
- teplá bílá: LCW G6CP-DAFA-4V9X
- studená bílá: LW G6SP-EAFA-JKQL-1

Společné parametry:

- V_F : 2,9 - 4,1 V
- I_F : 30 - 250 mA
- Pouzdro: PLCC6

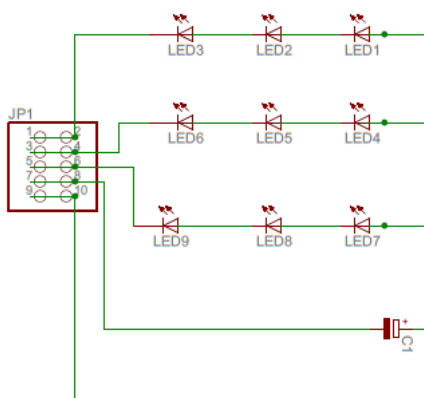
Advanced Power TOPLED Plus

- modrá: LDG5AP-4M4N-35-1
- teplá bílá: LCWG5GP-FYGY-5R8T
- studená bílá: LUW G5GP-GXHY-5C8E

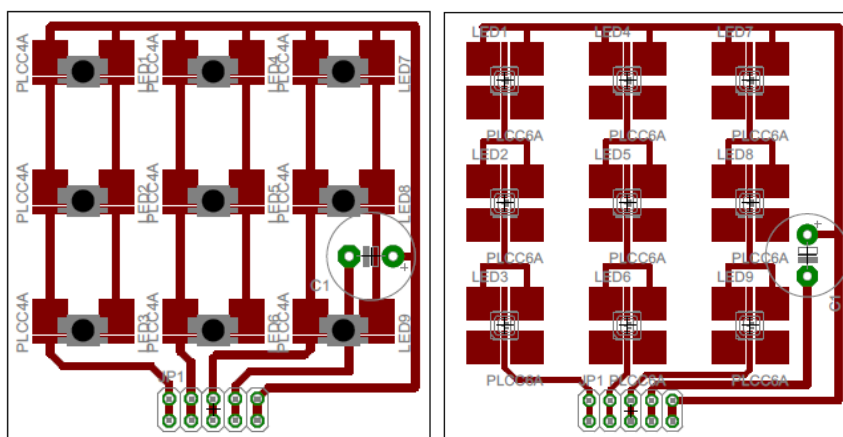
Společné parametry:

- V_F : 2,8 - 3,8 V
- I_F : 30 - 200 mA
- Pouzdro: PLCC4

Z důvodu vyššího proudového odběru použitých zdrojů optického záření došlo k rozdělení matice, takže každá sériová trojice je buzena samostatně. Kdyby byly všechny zdroje optického záření buzeny, jako celek z jednoho obvodu musel by se použít výkonnější tranzistor na výstupu operačního zesilovače a to by přineslo za následek zhoršení dynamických vlastností obvodu.



Obrázek 23: Schéma zapojení matice 3x3



Obrázek 24: Plošné spoje matice 3x3 pro obě kategorie Advanced Power TOPLED a Advanced Power TOPLED PLUS

Výpočet klidového proudu pro zapojený jumper JP1.

$$U_{R3||R6} = U_{R7}, \quad (6.5)$$

$$I_{kl} = \frac{U_{R3||R6}}{R7} = \frac{1,05}{10} = 105mA \quad (6.6)$$

Výpočet vstupní impedance u tohoto modulátoru je složitější než u jednoho obvodu. Protože se na ní podílí všechny tři obvody.

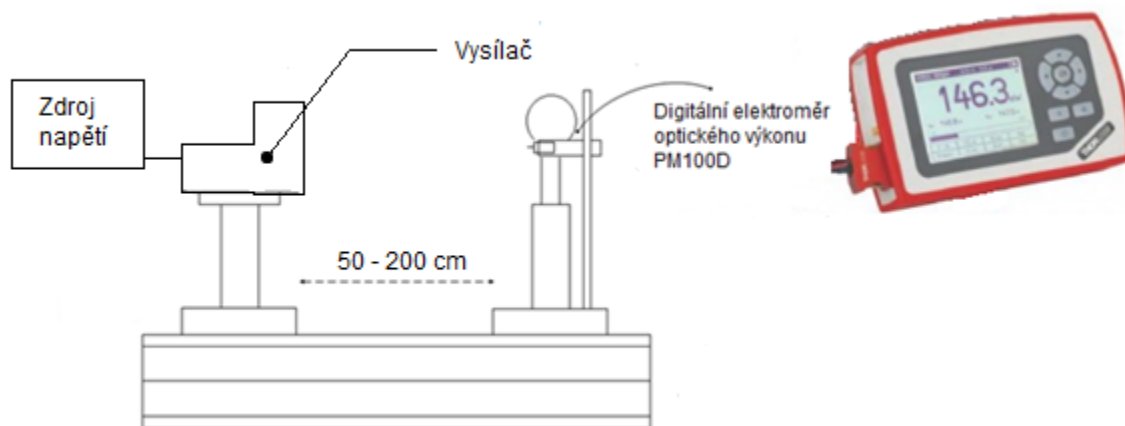
$$Z_{vst} = \frac{1}{\frac{1}{R1} + 3 \cdot \frac{1}{R2 + R10} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R6}} = \frac{1}{0,0191} = 52,3\Omega. \quad (6.7)$$

Dolní přenášenou frekvenci vstupního obvodu vypočteme podle vzorce:

$$F_d = \frac{1}{2\pi \cdot (R2 + R10) || R3 || R6 \cdot C1} = \frac{1}{42,64 \cdot 10^{-6}} = 23453Hz. \quad (6.8)$$

7 Měření výkonu vysílače v určitých vzdálenostech

Realizovaný vysílač byl podroben měření výkonu ve čtyřech různých vzdálenostech. Vzdálenosti jsou následující: 50, 100, 150 a 200 cm. Měření opět probíhalo v temné místnosti. Schéma pracoviště je možné si prohlédnout (viz Obrázek 26). Výkon se opět měřil digitálním elektroměrem ThorLabs PM100D. Při tomto měření byl opět použit filtr s dolní propustí 525 nm od firmy Edmund Optics.



Obrázek 26: Schéma pracoviště měření vysílače ve vzdálenostech 50, 100, 150 a 200 cm

7.1 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulek (Tabulka 3, Tabulka 4). V první tabulce jsou naměřené hodnoty bez použití filtru. V další tabulce jsou hodnoty s použitým filtrem. V porovnání se liší tím, že u bílých LED klesl výkon o více než 50% kdežto u modrých LED o méně než 10 %. Rapidní pokles výkonu způsobil právě použitý filtr, který potlačí oblast fosforescence a tím sníží patřičný výkon LED (viz Obrázek 20 a Obrázek 21).

Tabulka 3: Naměřené hodnoty výkonu pro různé vzdálenosti při protékajícím proudě 140 mA

Advanced Power TOPLED					
LED	λ	Vzdálenost 50cm	Vzdálenost 100cm	Vzdálenost 150cm	Vzdálenost 200cm
LB G6S9-V2BB-35-1	465 nm	12,68 uW	3,27 uW	1,325 uW	0,775 uW
LCW G6CP-DAFA-4V9X	445 nm	9,61 uW	2,5 uW	1,019 uW	0,605 uW
LW G6SP-EAFA-JKQL-1	460 nm	13,3 uW	3,44 uW	1,381 uW	0,828 uW
Advanced Power TOPLED PLUS					
LED	λ	Vzdálenost 50cm	Vzdálenost 100cm	Vzdálenost 150cm	Vzdálenost 200cm
LD G5AP-4M4N-35-1	460 nm	12,57 uW	3,16 uW	1,278 uW	0,774 uW
LCW G5GP-FYGY-5R8T	460 nm	7,46 uW	1,97 uW	0,805 uW	0,511 uW
LUW G5GP-GXHY-5C8E	445 nm	13,3 uW	3,44 uW	1,381 uW	0,828 uW

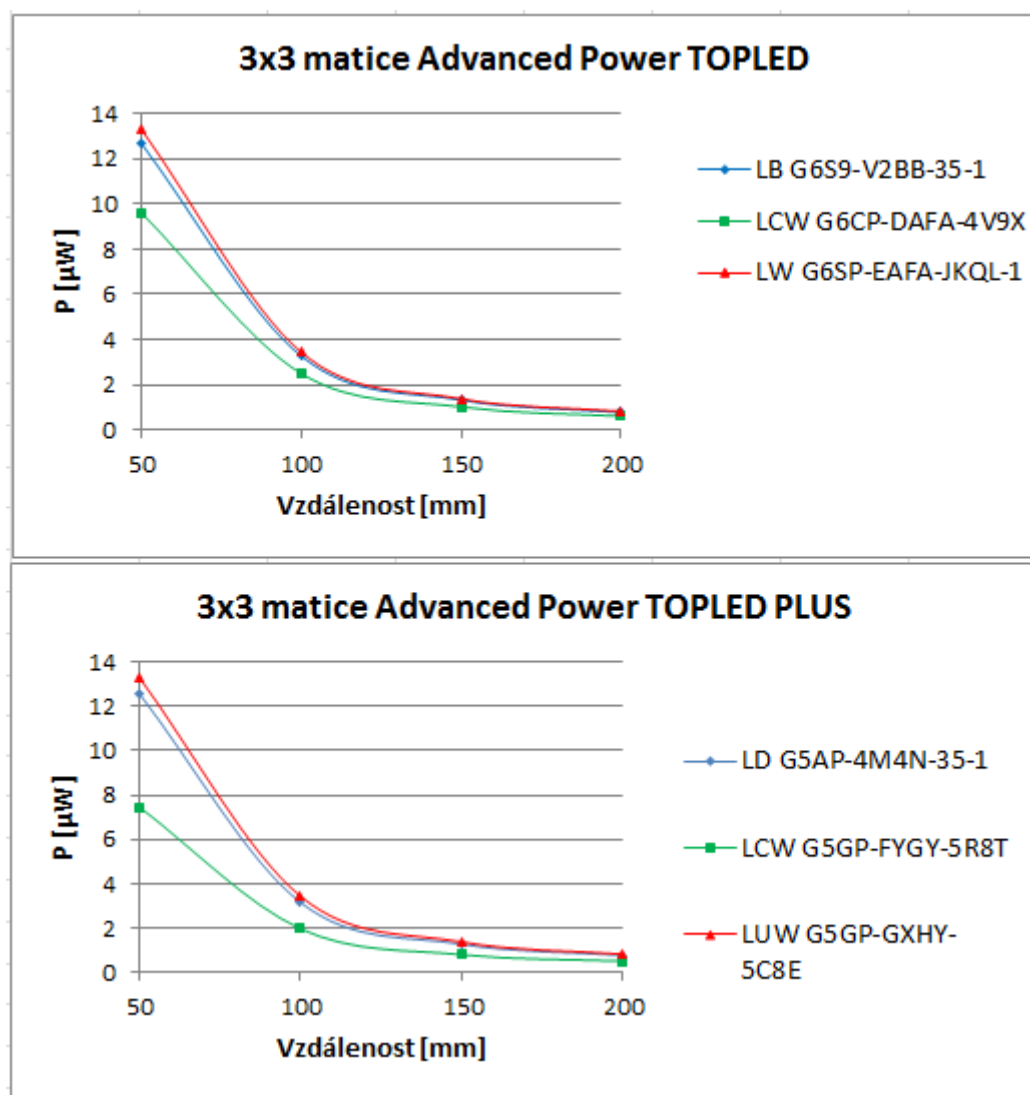
Tabulka 4: Naměřené hodnoty výkonu pro různé vzdálenosti při protékajícím proudu 140 mA s filtrem

Advanced Power TOPLED					
LED	λ	Vzdálenost 50cm	Vzdálenost 100cm	Vzdálenost 150cm	Vzdálenost 200cm
LB G6S9-V2BB-35-1	465 nm	11,666 uW	3,008 uW	1,219 uW	0,713 uW
LCW G6CP-DAFA-4V9X	445 nm	1,922 uW	0,5 uW	0,204 uW	0,121 uW
LW G6SP-EAFA-JKQL-1	460 nm	4,655 uW	1,204 uW	0,483 uW	0,290 uW
Advanced Power TOPLED PLUS					
LED	λ	Vzdálenost 50cm	Vzdálenost 100cm	Vzdálenost 150cm	Vzdálenost 200cm
LD G5AP-4M4N-35-1	460 nm	11,69 uW	2,939 uW	1,189 uW	0,72 uW
LCW G5GP-FYGY-5R8T	460 nm	1,492 uW	0,394 uW	0,161 uW	0,102 uW
LUW G5GP-GXHY-5C8E	445 nm	4,655 uW	1,204 uW	0,483 uW	0,29 uW

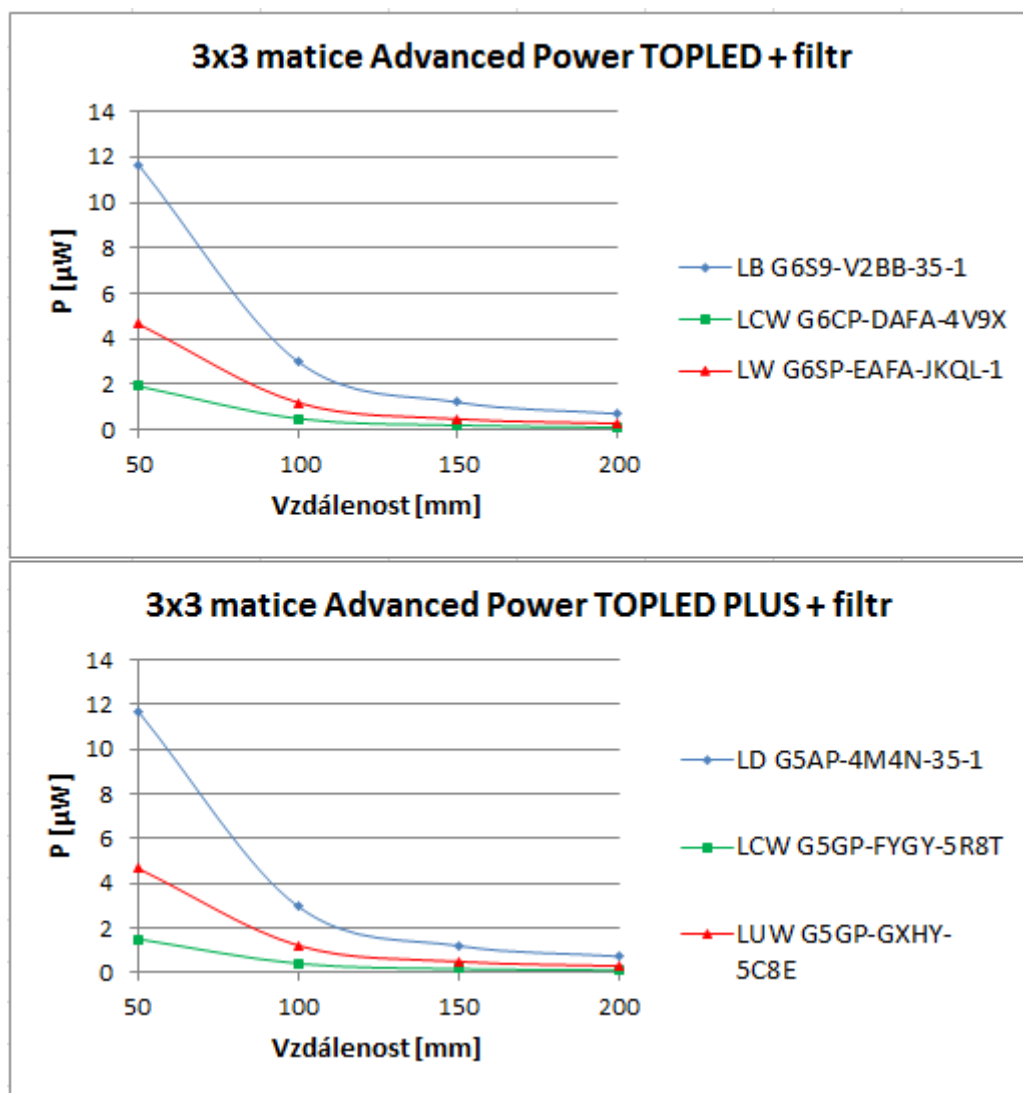
Podle tabulek (Tabulka 3, Tabulka 4) se dá přesně vypočítat reálná hodnota poklesu výkonu u jednotlivých zdrojů optického záření při použití filtru. Po přesném přepočítání jsou tedy výsledky zaznamenány v následující tabulce (Tabulka 5):

Tabulka 5: Reálně změřená propustnost filtru v %

Advanced Power TOPLED	
LED	Propustnost filtru
LB G6S9-V2BB-35-1	92%
LCW G6CP-DAFA-4V9X	20%
LW G6SP-EAFA-JKQL-1	34%
Advanced Power TOPLED PLUS	
LED	Propustnost filtru
LD G5AP-4M4N-35-1	93%
LCW G5GP-FYGY-5R8T	20%
LUW G5GP-GXHY-5C8E	35%



Obrázek 27: Závislost výkonu vysílacích matic 3x3 na vzdálenosti



Obrázek 28: Závislost výkonu vysílacích matic 3x3 na vzdálenosti s použitím filtru

8 Závěr

V této práci bylo za úkol navrhnout a realizovat optický vysílač pro vnitřní bezvláknovou komunikaci a následně provést měření výkonu vytvořeného vysílače.

Požadavky na optické zdroje vhodné k osvětlení místnosti stále rostou, a proto se většina klasických zdrojů nahrazuje progresivně se rozvíjející technologií LED. Výzkum této technologie v oblasti zvyšování měrného výkonu a možnosti změny barevného odstínu s kvalitním podáním barev CRI znamená nejenom využití pro osvětlení prostoru, ale v zároven i pro možnost využít ji jako vysílač pro sítě založené na optickém záření ve viditelné oblasti spektra VLC.

V teoretické části jsem se věnoval zdrojům optického záření, které jsou vhodné pro osvětlení místností a technologiím optických sítí. Dále jsem provedl analýzu LED. Jelikož společnost Osram Opto Semiconductors se zabývá světlem a osvětlovacími systémy již od roku 1906, tak jsem zvolil LED právě od tohoto výrobce. Vybrané LED jsem měřil na pracovišti, které jsem sám navrhnul. Na základě výsledků z měření jsem navrhnul a realizoval vyzařovací matice 3x3 LED. Z parametrů navržené matice jsem získal vstupní parametry pro návrh modulátoru. Jako operační zesilovač pro modulátor jsem zvolil typ LM7171, jehož výstup je posílen unipolárním tranzistorem BS170. Kvůli vyššímu proudovému odběru jsem modulátor rozdělil na tři samostatné větve.

Na závěr jsem provedl měření optického výkonu v různých vzdálenostech. Při měření jsem použil optický filtr s dolní propustí 525 nm. Ten zapříčinil pokles výkonu u bílých LED. U teplých bílých LED jsem zaznamenal snížení výkonu o 80 %, u studených bílých LED snížení o 65 %. Toto bylo způsobeno tím, že filtr potlačil oblast fosforescence bílých LED.

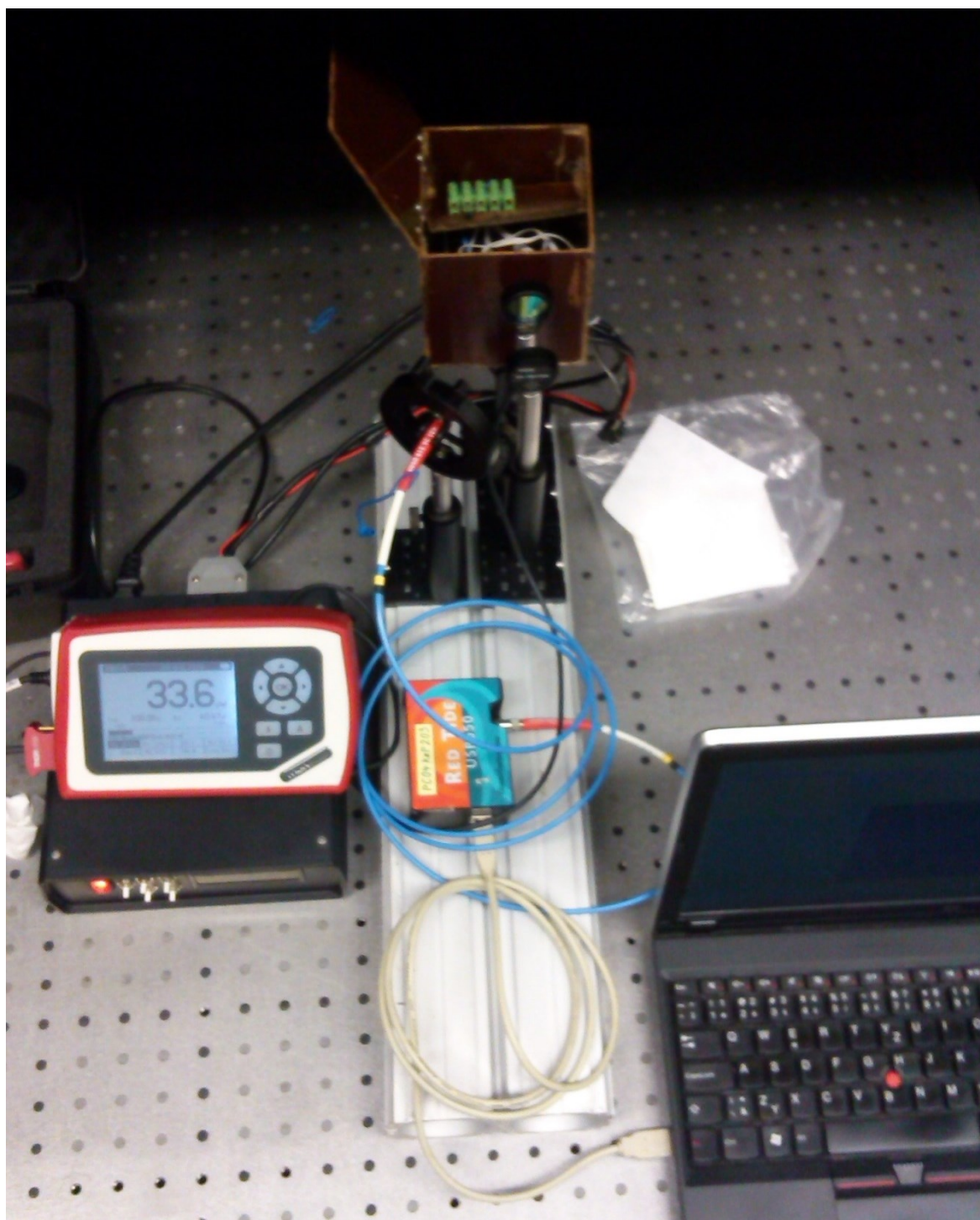
Tato bakalářská práce se zabývá technologií VLC, jelikož první výsledky této technologie se objevily teprve nedávno a to v roce 2011, tím pádem se technologie ještě plně nevyužívá a stále patří do oblasti výzkumu.

Literatura

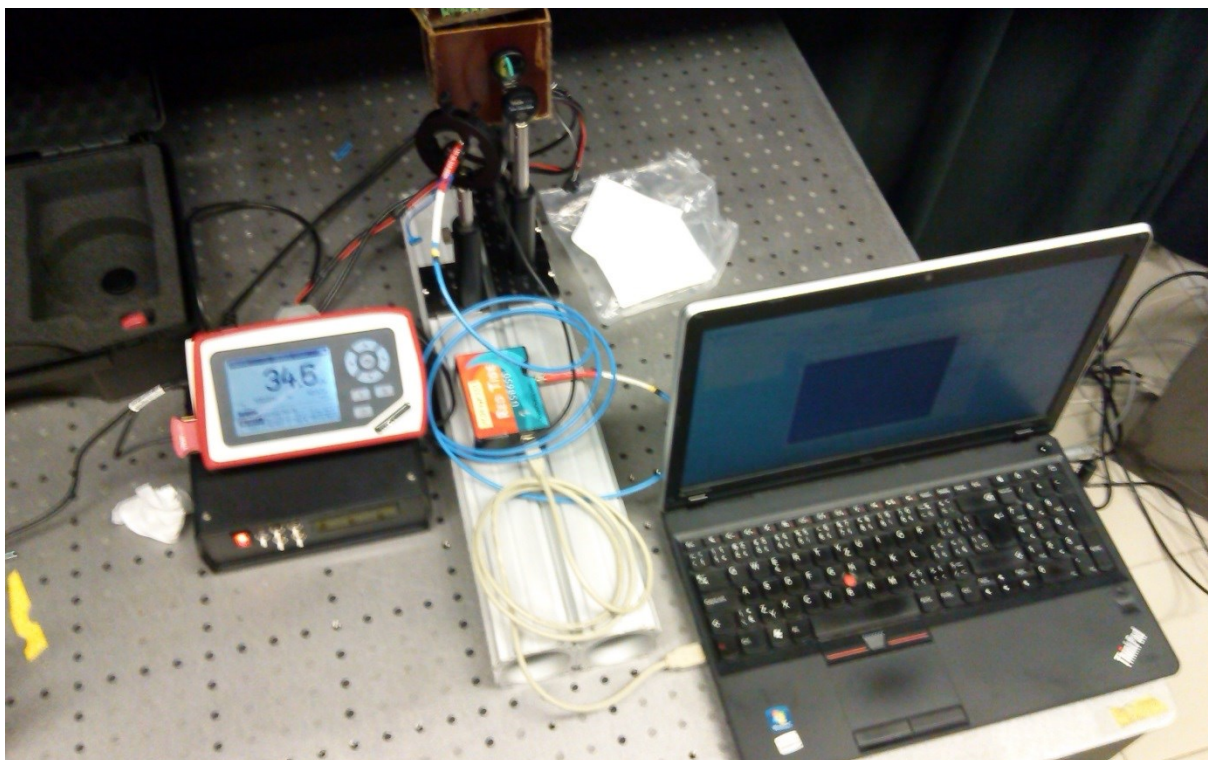
- [1] HALLIDAY, D., RESTNICK, R., WALKER, J. Moderní fyzika Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, VUT IUM, 2003.
- [2] WILFERT, O. Optoelektronika Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně, 2004.
- [3] DOBEŠ, J., ŽALUD, V. Moderní radiotechnika 1. vydání. Praha: Nakladatelství BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-132-2.
- [4] IEC 60825-1. Safety of Laser Products. Švýcarsko: International Electrotechnical Commission. Ženeva, 1998.
- [5] WiMAX. LOS versus NLOS. Dostupné z: <http://www.conniq.com/WiMAX/nlos-los.htm>
- [6] IrDa - Kompletní popis. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/irda-kompletni-popis.html>
- [7] KOUDELKA, Petr. Studium vlastností optické bezvláknové datové sítě pro vnitřní prostory v oblasti viditelného optického záření. 2012. Vedoucí práce prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
- [8] IEEE 802.15.7. PHY and MAC standard for short-range wireless optical communication using visible light. Dostupné z: <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/>
- [9] GHASSEMLOOY, Z, W POPOOLA a S RAJBHANDARI. Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB. Boca Raton: CRC Press, 2012, xlii, 517 s. ISBN 978-1-4398-5188-3
- [10] PUŽMANOVÁ, Rita. Bezdrátová optika a její možnosti. Dostupné z: <http://www.dsl.cz/clanek/533-bezdratova-optika-a-jeji-moznosti>
- [11] GFELLER, F. R. A U. BAPST. Wireless in-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation. Proceedings of the IEEE. 1979, č. 11, s. 1474-1486. ISSN 0018-9219.
- [12] IEC 60825-1. Safety of Laser Products. Švýcarsko: International Electrotechnical Commission. Ženeva, 1998.
- [13] RICHTR, Tomáš. Protokoly technologie IrDA. Dostupné z: <http://tomas.richtr.cz/mobil/irda-protokoly.htm>
- [14] IEEE 802.15.7. PHY and MAC standard for short-range wireless optical communication using visible light. Dostupné z: <http://visiblelightcomm.com/an-ieee-standard-for-visible-light-communications/>

A Příloha

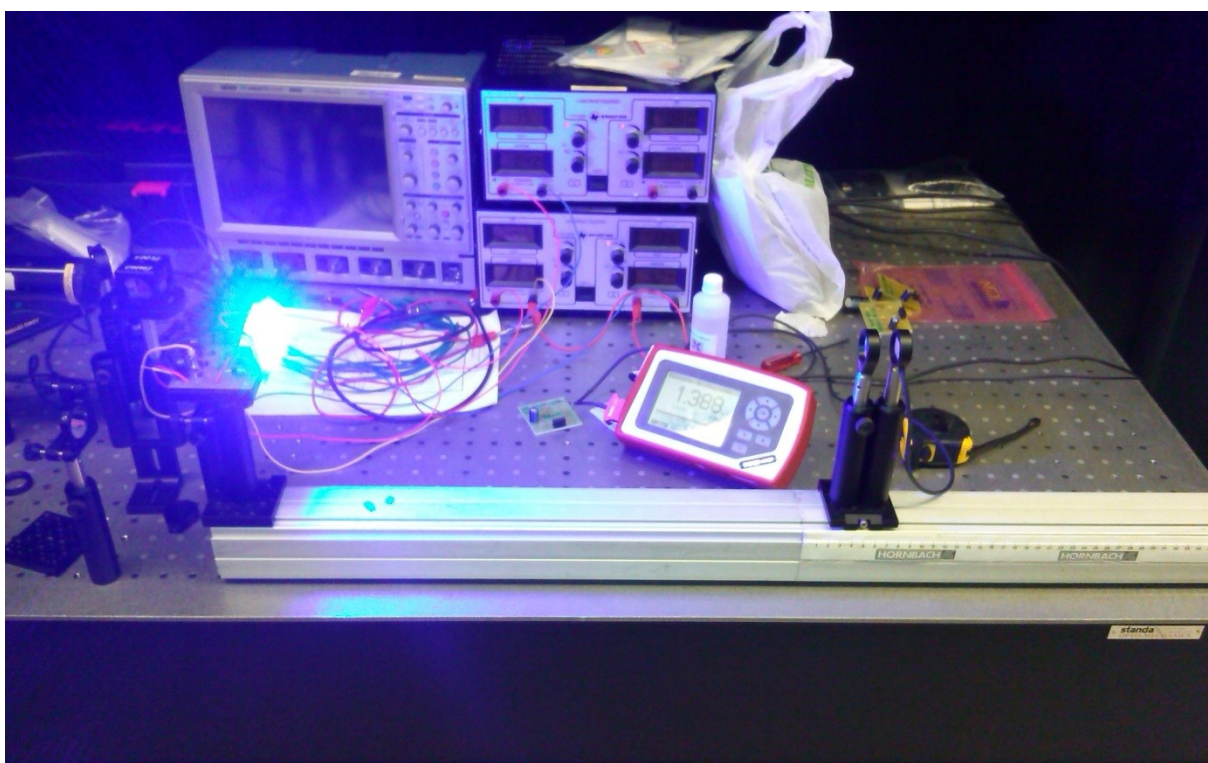
A.1 Fotografie



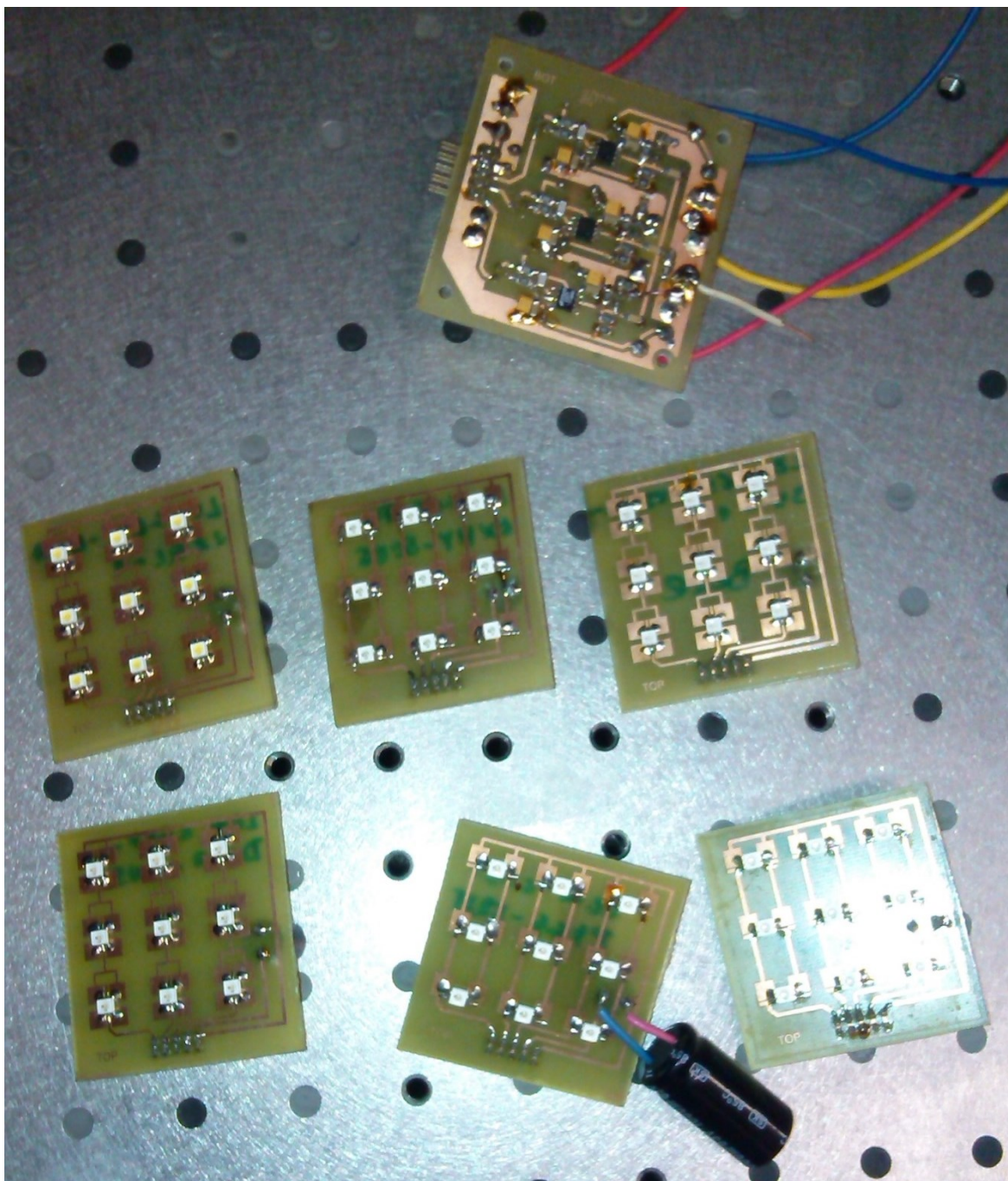
Obrázek A. 1: Fotografie měřicího experimentálního pracoviště 1



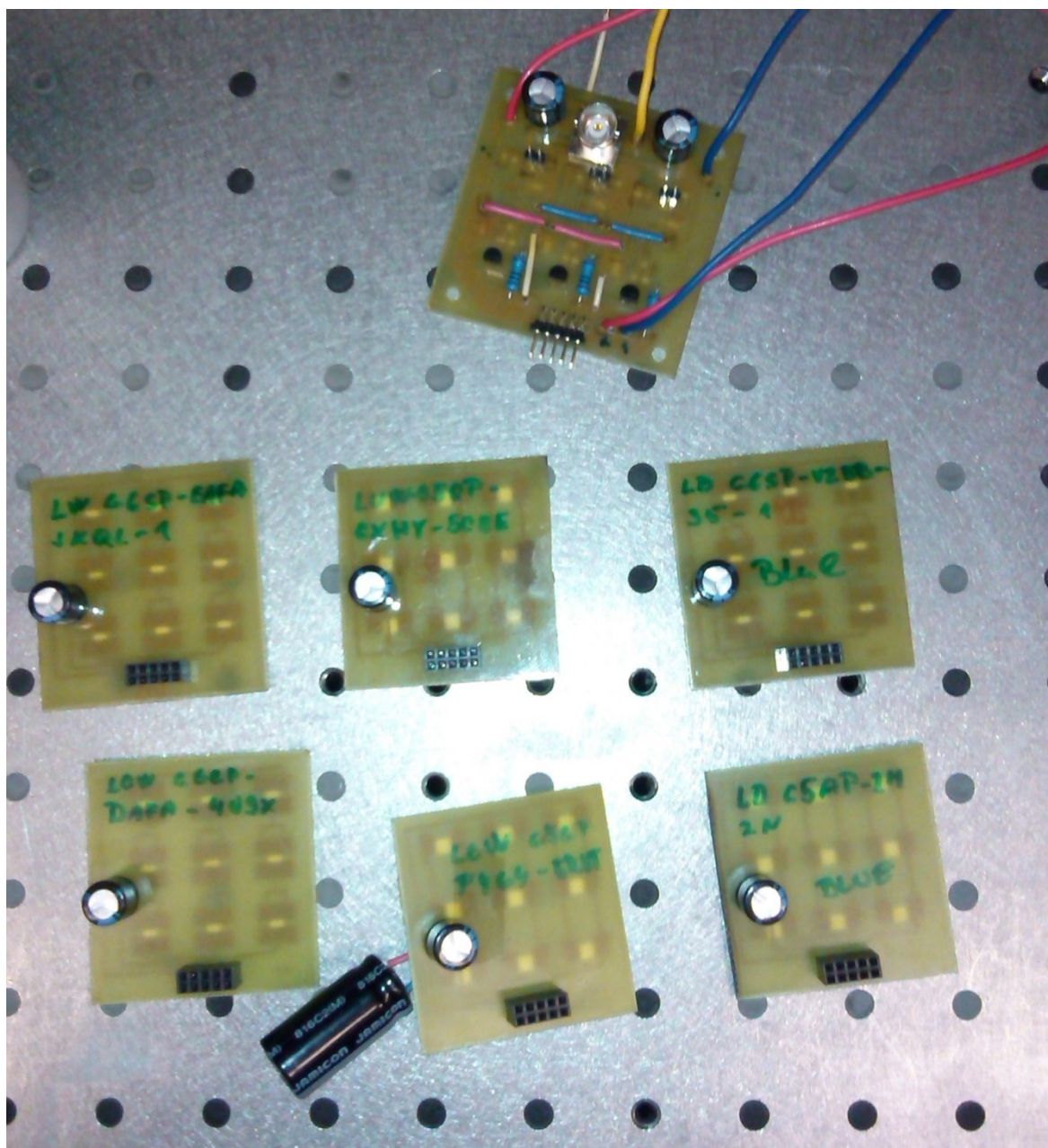
Obrázek A. 2: Fotografie experimentálního měřicího pracoviště 2



Obrázek A. 3: Fotografie experimentálního měřicího pracoviště 3



Obrázek A. 4: Fotografie modulátoru a matic 3x3 LED 1



Obrázek A. 5: Fotografie modulátoru a matic 3x3 LED 2

B Elektronické přílohy

B.1 Datasheety všech použitých LED

Soubory jsou ve formátu PDF jsou umístěny na příloženém CD: /CD/BP/datasheets/

B.2 Datasheet optického filtru 525nm OD 2 Shortpass Filter

Soubor ve formátu PDF je umístěn na příloženém CD: /CD/BP/datasheets/

B.3 Tabulky naměřených hodnot

Soubor ve formátu XLS je umístěn na příloženém CD: /CD/BP/tabulky.xls

B.4 Fotografie

Soubory ve formátu JPG jsou umístěny na příloženém CD: /CD/BP/photos/